

2. 2 サブテーマ2

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

火山災害対策技術の開発「リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発」

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
国立大学法人京都大学	共同実施機関	教授	井口 正人
国立大学法人京都大学	共同実施機関	准教授	中道 治久
国立大学法人京都大学	共同実施機関	准教授	為栗 健
国立大学法人京都大学	共同実施機関	助教	山本 圭吾
国立大学法人京都大学	共同実施機関	助教	山田 大志
国立大学法人京都大学	共同実施機関	教授	竹見 哲也
国立大学法人京都大学	共同実施機関	教授	丸山 敬
国立大学法人京都大学	共同実施機関	特定教授	山路 昭彦
国立大学法人京都大学	共同実施機関	准教授	志村 智也
国立大学法人京都大学	共同実施機関	研究員	真木 雅之
国立大学法人京都大学	共同実施機関	RA	瀧下 恒星
国立大学法人京都大学	共同実施機関	RA	高橋 龍平
国立大学法人筑波大学	協力機関	教授	田中 博
国立大学法人神戸大学	協力機関	教授	大石 哲
国立大学法人東北大学	協力機関	准教授	太田 雄策
国立大学法人東京大学	協力機関	准教授	鈴木 雄治郎
国立研究開発法人国立環境研究所	協力機関	主任研究員	清水 厚
一般財団法人日本気象協会	協力機関	部長	佐々木寛介
一般財団法人日本気象協会	協力機関	技師長	井上 実
国立大学法人鹿児島大学	協力機関	准教授	西 隆昭
国立大学法人高知大学	協力機関	教授	佐々浩司
国立大学法人北海道大学	協力機関	名誉教授	藤吉 康志
FRS コーポレーション	協力機関	社長	徳島 秀彦

(c) 業務の目的

火山灰に対して噴火前の予防的対策及び噴火後の迅速な防災対策のために、火山灰ハザードの予報的及び即時的評価を可能とする技術の実現を目指し、地上観測および大気中その場観測に裏付けされるリモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発、地震及び地盤変動観測データとシミュレーションを統合した火山灰拡散予測の高速度化技術開発、空間分解能の高い風速場把握および落下粒子特性把握による火山灰拡散予測の高精度化技術開発、連続的な噴火を対象とした火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの

技術開発、噴火発生前の確率的降灰予測の技術開発を実施し、「課題D サブテーマ 3：火山災害対策のための情報ツールの開発」に解析結果を出力することを目的とする。

(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

リモートセンシングによる大気中の火山灰の検知及び地上の火山灰観測に着手するとともに、火山灰拡散予測の高速化及び高精度化のための技術開発を開始した。

2) 平成 29 年度：

桜島、霧島、薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島火山においてレーダー観測を開始し既存のリモートセンシング観測を強化した。レーダーの反射強度と降灰量を比較し、両者の関係を検討した。火山灰拡散予測の高速化のために桜島南部の観測点の傾斜計及び地震計を改修した上で、地盤変動や地震動のデータベースを整備した。また、高精度化のために、再現された風速場をドップラーライダーやドローンを用いた大気中のその場観測により検証した。噴煙の最上部に現れる傘雲の形成を考慮するように火山灰拡散モデルを改良した。

3) 平成 30 年度：

南九州 5 火山におけるレーダー観測を継続した。ディストロメータを火口から直線状に配置することにより、降灰量と粒径分布の距離依存性を明らかにした。XバンドMPレーダーにより観測される噴煙の反射強度と地上降灰量の経験的關係式の精度を向上させた。GNSSを桜島の北東側の大隅半島に設置し、桜島島外の火山灰観測を強化した。桜島東部の黒神観測井に設置されている地震計及び傾斜計を改修作業し、地盤変動及び火山性微動振幅データから火山灰噴出率を求める推定式を高精度化させた。また、噴火の発生を自動的に検知して、PUFFモデルを自動的に起動できるように改良した。ドローンやドップラーライダーを用いた大気中および地上における火山近傍での大気中の風向・風速観測と照合することにより、気象モデルの妥当性を検討して風の場の再現の高精度化を図った。また、FALL3Dによる桜島近傍の火山灰拡散シミュレーションを行い、地上降灰量と比較して、精度検証・高精度化を図った。ホノルルで開催される国際会議(Asia Oceania Geosciences Society)において、研究成果を発表するとともに研究に関する情報収集を行った。さらに、風洞実験装置を利用してレキの空力特性を把握した上で、瓦や壁材を対象にレキへの耐衝撃性能試験を行い、サブテーマ D3 に引き渡す基礎データを作成した。

4) 平成 31 年度（令和元年度）：

即時把握技術開発においては、XバンドMPレーダー、GNSS、ライダーによるリモートセンシング観測を継続することにより、このマルチパラメータ観測システムが噴煙高度や降灰量等の即時的把握と噴煙量の推定に有効であることが示された。予測の高速化技術においては、傾斜計及び地震計を改修することにより、噴火の発生、地震動や地盤変動データからの噴出率と噴煙高度の評価パラメータを高度化が図られた。予測の高精度化においては、火山体周辺の風速ベクトル分布を高分解能で把握することにより、降灰量の予測がさらに改善された。太陽光パネルの破壊実験のデータをサブテーマ D3 に引き渡した。

5) 令和 2 年度 :

令和 2~4 年度は、長時間継続する噴火に対応するために、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムを開発する。令和 2 年度はそのためのデータベースを整備した。これらのデータベースは、火山灰噴出率、レーダー噴煙高度、高解像度風速場、降下火山灰量である。噴出率の評価については、観測坑道をはじめとする桜島の高精度観測により、かなり実用的なものになった。即時把握技術開発においては、X バンド MP レーダーにより南九州の 4 火山において噴煙を検知する実績が積み上がり、実用段階となった。

6) 令和 3 年度 :

引き続き、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発を進める。大規模噴火等の連続噴火に対応するためのシミュレータの改良設計を行う。

7) 令和 4 年度 :

引き続き、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発を進める。オンラインシステムを実装し、地上降灰量の時間変化と比較することにより予測精度を評価する。

8) 令和 5 年度 :

令和 5~7 年度は、噴火発生前の降灰確率の予測をめざす。過去の地盤変動データを整理し、前駆地盤変動継続時間および圧力源の前駆体積変化量をデータベース化して、発生時刻と規模の確率的予測を行う手法を開発する。また、気象庁により提供される風速ベクトル予測値から複雑な火山地形を考慮した高分解能の風速ベクトル場を予測する研究を行う。

9) 令和 6 年度 :

発生時刻と規模の確率的予測をオンラインシステムとして稼働させるため、膨張開始時刻の高精度決定手法を開発し、高精度化を図る。また、時間関数として噴出率を与えられるように理論的な噴出率モデルを構築する。火山地形を考慮した詳細な予測風速ベクトルおよび予測降灰量を観測量と照合することにより、噴火発生前の予測精度を検証する。

10) 令和 7 年度 :

前年度の予察的なシミュレーション結果と噴火発生後の観測量の照合に基づいて問題の所在を検討した上で、予測手法の改良を行い、高精度化を図る。

(e) 令和 3 年度における成果の目標及び業務の方法

これまで進めてきた「リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発」、「火山灰拡散予測の高速化技術開発」、「火山灰拡散予測の高精度化技術開発」を引き続き継続する。観測継続による新たなデータの蓄積により、噴煙の検出の定量化を図るとともに、火山灰拡散予測の高速化および高精度化を進める。令和 2~4 年度は、長時間継続する噴火に対応するために、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムを開発するが、令和 4 年度に実装する連続化火山灰拡散予測シミュレータのための技術的な検討を令和 3 年度は実施する。

1) プロジェクトの総合推進

当該プロジェクトと関連する「課題C サブテーマ3」および「課題D サブテーマ3」と連携を図りつつ、研究集会を開催する。

2) リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発

霧島、桜島、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島においてレーダー観測を継続し、必要なメンテナンス作業も併せて行う。これまでに桜島を取り巻くように設置したディストロメータによる降灰観測を継続することにより、降灰量の時間変化を把握する。また、噴火頻発期や規模の大きい噴火が発生したときには火山灰採取のキャンペーン観測も実施する。その上で、XバンドMPレーダーにより観測される噴煙の反射強度と地上降灰量、また、ディストロメータの出力値と地上降灰量の関係について、さらに多くの噴火事例を得ることにより、その経験的関係式の精度を上げる。また、スキャン頻度が高い船舶レーダーにより噴煙を観測することにより、時間分解能の高い噴煙の上昇および移流・拡散状態を把握する。

これまでに設置したGNSSによる噴煙観測を継続し、解析によって得られるLC搬送波位相残差及びSN比の低下について、噴火様式や噴煙に含まれる水蒸気量と関連付けて検討する。

桜島島内に設置した2台のライダーによる火山灰観測を継続する。ライダーで観測可能な火山灰消散係数の上限を決定した上で火山灰消散係数について気候学的解析を行い、大気環境常時監視局データとの照合を行う。火山灰の輸送拡散数値モデルを検証するためのデータセットを引き続き作成するとともに、消散係数と火山灰噴出量の関係を検討する。

なお、研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合において、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトのプロジェクト・リーダーが当該火山を対象とした緊急観測の実施を決定した際は、ここで実施する現地観測について、その一部もしくはその全てに代えて緊急観測を実施することを可能とする。

3) 火山灰拡散予測の高速化技術開発

桜島北西部にあるハルタ山の既設観測井に設置されている地震計及び傾斜計について、本研究への活用のために引き上げ及び改修作業を行う。このことにより、桜島北西部方面の地盤変動及び火山性微動振幅から求められるブルカノ式噴火発生に伴う噴出率見積もり方式を定式化し、これを降灰量分布から求めた噴出量と比較することにより、地盤変動及び火山性微動振幅データから過去に求めた噴出率推定式を高精度化する。また、火山灰噴出率推定式を桜島以外の火山に拡張するために、桜島における広帯域地震記録の超長周期成分の解析を行うとともに、長期間の噴火活動を継続している諏訪之瀬島やインドネシアのシナブン火山の火山性微動を解析し、推定式の拡張性について検討する。

課題C3と連携し、噴煙柱形成・火山灰拡散を同時に再現する高精度シミュレーションを実行する。これにより、ブルカノ式噴火の噴火強度に対する噴煙高度と火山灰堆積分布の応答に関するデータベースを充実させる。

4) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

気象モデル WRF による高分解能シミュレーションおよび分解能を変えたシミュレーションから、火山の地形の影響を受けた拡散場の再現性の評価に基づき、火山灰拡散を精度良く予測するためのシミュレーション条件を評価する。特に、火山地形の影響を受けた鉛直風の影響を適切に取り入れ、火山地形の影響を取り込んだ火山噴煙のモデル化と気象モデルによる予測シミュレーションを実施する。予測精度の検証には、現地で実施される様々な実測データを活用する。

ドローンによる上空の火山ガス、火山灰の濃度を計測(年2回程度)し、鉛直プロファイルを把握する。取得したデータにより、地上観測機器や気象データとの比較、気象モデルの妥当性評価等を実施する。

火山周辺の気流をさらに高精細化させるため、WRF から得られる気象場を境界条件とし、地形の凹凸、地表面の植生や構造物など気流を乱す粗度の影響を考慮して、非定常な乱流場の計算を行うことのできるキャノピーモデルを用いたラージエディシミュレーションを用いて、噴火時の火山周囲の気流性状を明らかにする。

ディストロメータは火山灰粒子の落下速度も計測できるので、観測された落下速度から見かけの粒子比重を求めることにより、火山灰粒子の凝集の程度をさらに多くのデータを用いて評価する。

5) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発

オンライン化を図るために、データの集約システムを開発する。オンラインで集約されるデータは地震及び地盤変動データから計算される噴出率、レーダー観測により得られる火口直上の反射強度、地上風速データ、ディストロメータ観測による火山灰の粒径・落下速度毎の粒子数である。また、気象モデルの気象場を WRF により高分解能化した気象場データは随時、データベースに追加する。集約システムが完成すれば、課題 A の JVDN が受け入れ可能なものから順次、JVDN へ自動送信を行う。また、気象モデルや地上気象観測から得られる現在の気象場に類似した気象場に対応する高分解能風速場をデータベースから抽出する手法を開発する。さらに、火山灰の移流拡散モデルを噴出率の連続データに対応できるように改良を検討する。

(2) 令和3年度の成果

(a) 業務の要約

令和3年度においては、これまでに単発的なブルカノ式噴火の観測及び解析によって培われた火山灰放出量の即時把握技術、予測の高速化及び高精度化技術をさらに発展させたいと、噴出率の時間変化を取り扱うことにより、長時間継続する噴火活動に対処しようとした。リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発、火山灰拡散予測の高速化技術開発、火山灰拡散予測の高精度化技術開発においては、令和2年度までの観測を継続して、火山灰に関連する新たなデータを取得することにより、これらの技術をさらに高度化させることにある。新たに加わった技術開発は、船舶レーダーの活用による長時間分解能化と非定常な乱流場の計算を行うことのできるキャノピーモデルを用いたラージエディシミュレーションによる高精度化である。

(b) 業務の成果

令和3年度の業務の成果を1) プロジェクトの総合推進、2) リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発、3) 火山灰拡散予測の高速化技術開発、4) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発、5) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発に分けて、以下に述べる。

1) プロジェクトの総合推進

「課題C サブテーマ3」および「課題D サブテーマ3」とオンラインで打ち合わせを行った。

桜島火山防災協議会の構成メンバーである鹿児島県、鹿児島市、垂水市、九州地方整備局等と連携して大量降灰の予測、避難等の意思決定、対策のための勉強会を7月、8月、10月、11月に開催した。

2) リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発

桜島においてレーダー、GNSS、ライダー光学観測によるリモートセンシングおよびディストロメータを用いた地上観測からなる火山灰観測を継続した。図1にマルチパラメータ観測の概要を示す。レーダーは霧島山、薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島にも設置されている。ライダーについては点検を外部委託するとともに、YAGレーザーのフラッシュランプを交換して観測の継続性の安定化を図った。レーダーとGNSSについてはおおむね順調に稼働した。令和3年度は、スキャン速度の速い船舶レーダーを新たに桜島に導入し、観測を開始した。

ここで用いるレーダーはXバンドであり、周波数は約9GHz、波長は約3cmである。GNSSはLバンド帯(L1: 1.5GHz、L2: 1.2GHz)を使用し、波長は、それぞれ19cm、24cmとなり、レーダーより長い。これまでの観測により、桜島において気象庁が「噴火」とする現象に対してはXバンドレーダーでその噴煙を捕捉できている。GNSSは波長が長いこと、またGNSS衛星は汎地球的に配置されていることから、より大規模な噴煙に対して有効である。レーダーは空間をスキャンする技術であるが、GNSSでは測位衛星を用いるために、噴煙の検知は衛星の位置に依存し、空間分解能ははるかに劣る。

ライダーは光を照射し、その後方散乱波を検出する技術であり、緑色の 632nm の波長を用いる。レーダー、GNSS よりもはるかに短波長である。従来エアロゾル観測に用いられてきた技術で、噴火とも言えないきわめて濃度の希薄な噴煙を検知できるのが特徴である。一方、波長が短いために、噴煙を透過することはできず、観測される後方散乱は噴煙柱の極表面の情報のみを持っている。

レーダーは噴火による噴煙をスタンダードに検出する技術、GNSS はより大規模噴煙に対応し、ライダーは希薄火山灰の浮遊を検出する技術に位置づけられる。

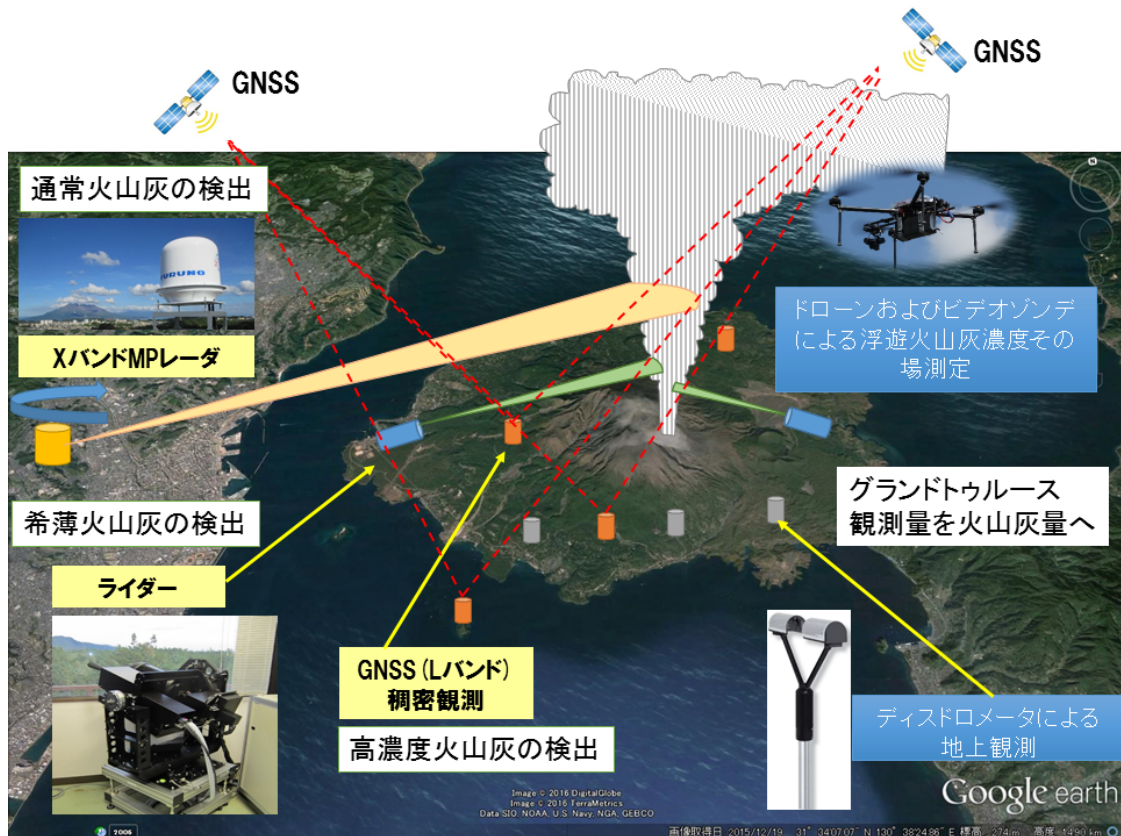


図 1 火山灰のマルチパラメータ観測の概要。

a) レーダー観測

21 世紀以降、噴火が発生した霧島山、桜島、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島を対象に、X バンド MP レーダーによる噴煙の連続観測を 2017 年 8 月から現在まで継続している。ここでは、レーダーによる噴煙観測の成果について述べる。

i) 観測の概要

レーダーの設置場所は鹿児島県内 6 カ所で表 1 に示す通りである。また、走査の仰角と方位角のパラメータを表 2 に示す。

表1 レーダー基地局の場所

対象火山名	施設名	住所	緯度 (°)、経度 (°) 標高 (m)
霧島山	霧島市立牧園中学校	霧島市牧園町宿窪 田751-1	31.85784, 130.75134 225
桜島	京都大学防災研究所 火山活動研究センター	鹿児島市桜島横山 町 1722-19	31.58960, 130.60115 44
桜島	鹿児島県立錦江湾高 等学校	鹿児島市平川町 4047	31.445607, 130.507227 105
薩摩硫黄島	三島村竹島焼却所	鹿児島郡三島村竹 島	30.81314, 130.40938 65
口永良部島	口永良部島避難所	熊本郡屋久島町口 永良部島番屋が峰 207-4	30.470361, 130.176036, 281
諏訪之瀬島	諏訪之瀬島キャンプ 場	鹿児島郡十島村諏 訪之瀬島	29.61125, 129.70547 119

表2 レーダーの走査モード及びパラメータ (2022年3月1日現在)

火山名	HSQ スキャン*	セクターRHI スキャン**	
	仰角 (°)	方位角 (°)	仰角範囲 (°)
霧島山	10, 15, 20, 25, 35, 40	設定なし	
桜島 (火山活動研究センタ ー)	設定なし	95~115	10~57
桜島 (錦江湾高等学校)	2, 5, 10, 15, 20, 25, 30	設定なし	
薩摩硫黄島	5, 10, 15, 20, 30, 45, 60	設定なし	
口永良部島**	5, 10, 15, 20, 30, 45, 60	設定なし	
諏訪之瀬島	設定なし	10~20***	10~60***

*HSQ スキャンは、水平面での走査

**セクターRHI スキャンは鉛直断面での走査である。

***口永良部島は 2018 年 8 月から 2021 年 8 月までセクターRHI スキャン観測をおこなった。諏訪之瀬島は 2020 年 8 月以降、セクターRHI スキャンで観測を継続しているが、2021 年 8 月 28 日に仰角を 10-45° から 10-60° に変更した。

レーダーの設置状況を図2及び図3に示す。使用したレーダーは古野電気（株）製WR-2100である。中心周波数は9432.5MHz、空中線出力は100Wであり、およそ30kmの範囲を観測することが可能である。レーダーの観測範囲を図4に示す。データ収録装置（PC）により、制御され、生データはハードディスクに収録される。PCにより雨量データに変換され、雨量データは火山活動研究センターのサーバーに転送している。レーダーの生データはデータ量が大いので、半年に1回の頻度で定期的にハードディスクを交換した。



図2 レーダーの設置状況。鹿児島県立錦江湾高等学校に設置。



図3 レーダーの設置状況。霧島市立牧園中学校に設置。



図4 霧島山、桜島、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島における X バンド MP レーダーの観測範囲

ii) 桜島噴火

2022年1月28日13時19分（UTC時刻4時19分）に発生した噴火について述べる。この噴火は2021年1月から2022年3月までに発生した噴火の中でもっとも噴煙高度が高く、火口上3400 mに達した（鹿児島地方気象台）。図5に噴火開始直後から7分後までのレーダー反射強度分布を示す。反射強度分布から20dBzの等反射強度の最高高度を噴煙高度とすると、噴火開始から2分経過時の噴煙高度は火口上2300 m程度で、噴火開始から4分経過後に噴煙高度は火口上3400 m程度であることが見て取れる。この図は北から時計回りに105度もしくは109度の断面図を示しているが、時間経過とともにレーダーサイト（Distance=0 km）から東南東方向へ離れる方向に噴煙が流れていることが見て取れる。

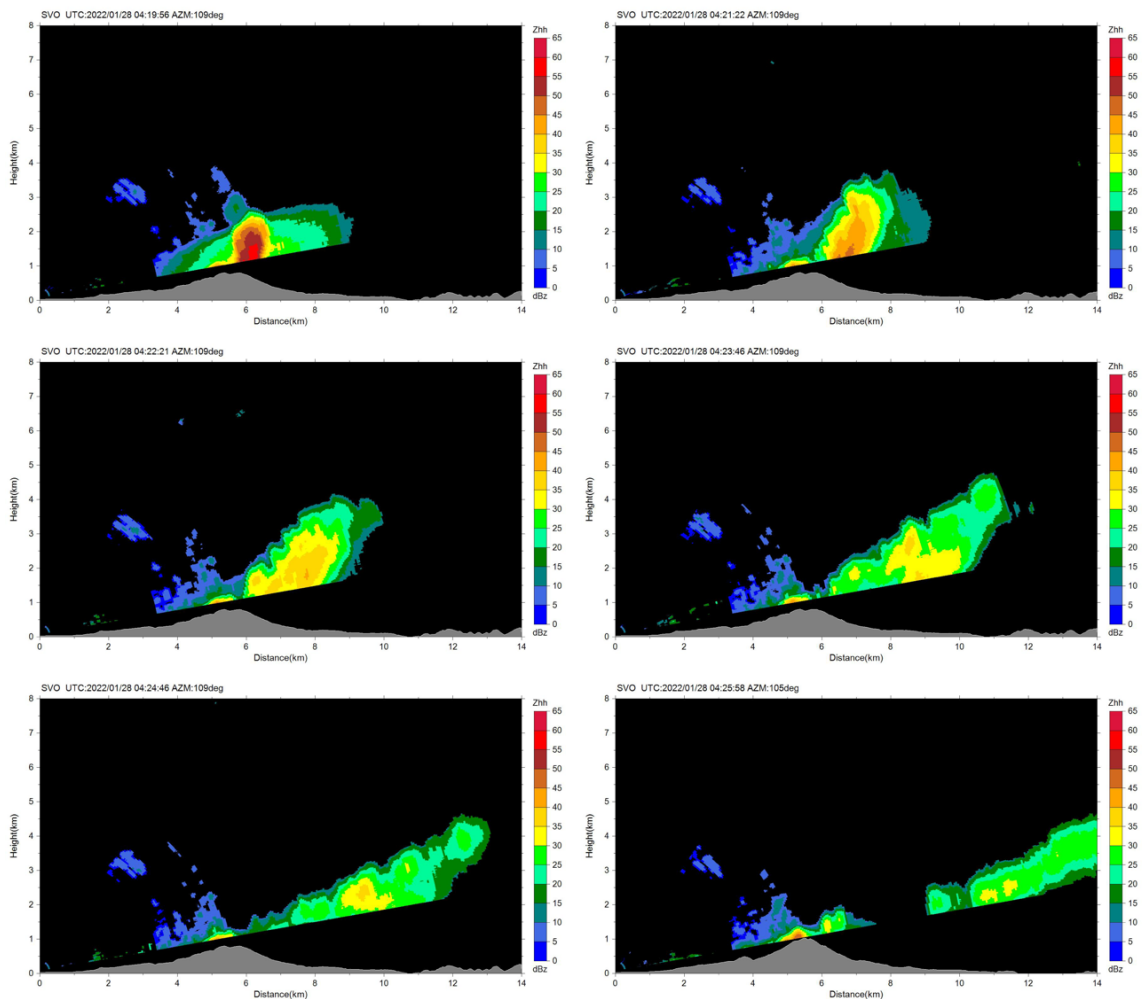


図5 桜島火山観測所に設置したレーダーによる噴煙の反射強度分布。RHI スキャンによる。2022年1月28日13:19～13:26のレーダーによる噴火映像。図記載の時刻はUTC時刻。AZMは北から時計回り方位角を示す。

iii) 諏訪之瀬島噴火

2020年に引き続き2021年においても諏訪之瀬島において噴火が頻発した。気象庁が2021年に発表した諏訪之瀬島の噴火に関する火山観測報のうち本報告書にてレーダー反射強度分布を示す噴火を表3に示す。なお、空振振幅は京都大学が諏訪之瀬島のSWA観測点に設置している空振計による値を用いた。噴火の時刻はSWA観測点における空振到来時刻を示す。噴煙高度と流向は気象庁の噴火に関する観測報によるもので、噴煙高度は火口位置の標高を海拔600mとしたときの、火口からの相対高度である。

表3 レーダー反射強度を図示する噴火リスト

日時分	噴煙高度(m)	レーダー噴煙高度(m)	空振(Pa)	流向	図
2021/7/7 0:10:43	不明	不明	591.0	不明	図6
2021/7/31 18:44:44	不明	不明	28.6	不明	図7
2021/9/26 7:11:06	5400	5200	11.6	直上	図8

2021年の噴火において最大の空振振幅（SWA観測点にて591Pa）を伴った噴火は7月7日の0:10の噴火である。この噴火時のレーダー反射強度分布を図6に示す。レーダーサイト（Distance = 0 km）から3.6 kmのところの御岳火口があるが、20dBzの等反射強度の最高到達高度は海拔1000 mである。また、20dBzの等反射強度の分布が噴煙形状をしておらず、火口付近に定在し、形状が時間変化していない。

2021年7月31日の18:15に噴煙高度3800 mの噴火が発生し、その後18:26から21:09までストロンボリ式噴火が頻発した。この時間帯のうち18:40から18:46のレーダー反射強度分布を図7に示す。反射強度分布は図6で示した反射強度分布とほぼ同じであり、20dBzの等反射強度の分布は噴煙形状をしていない。

2021年の噴火において噴煙高度が最高値（気象庁によると火口上5400 m、海拔6200 m）となった噴火は9月26日の7:11の噴火であり、噴火時のレーダー反射強度分布を図8に示す。反射強度分布から20dBzの等反射強度の最高高度を噴煙高度とすると、この時間における噴煙の最高到達高度は海拔6000 m、つまり火口上5200 mとなり、気象庁が目視で推定した噴煙高度より若干低い。

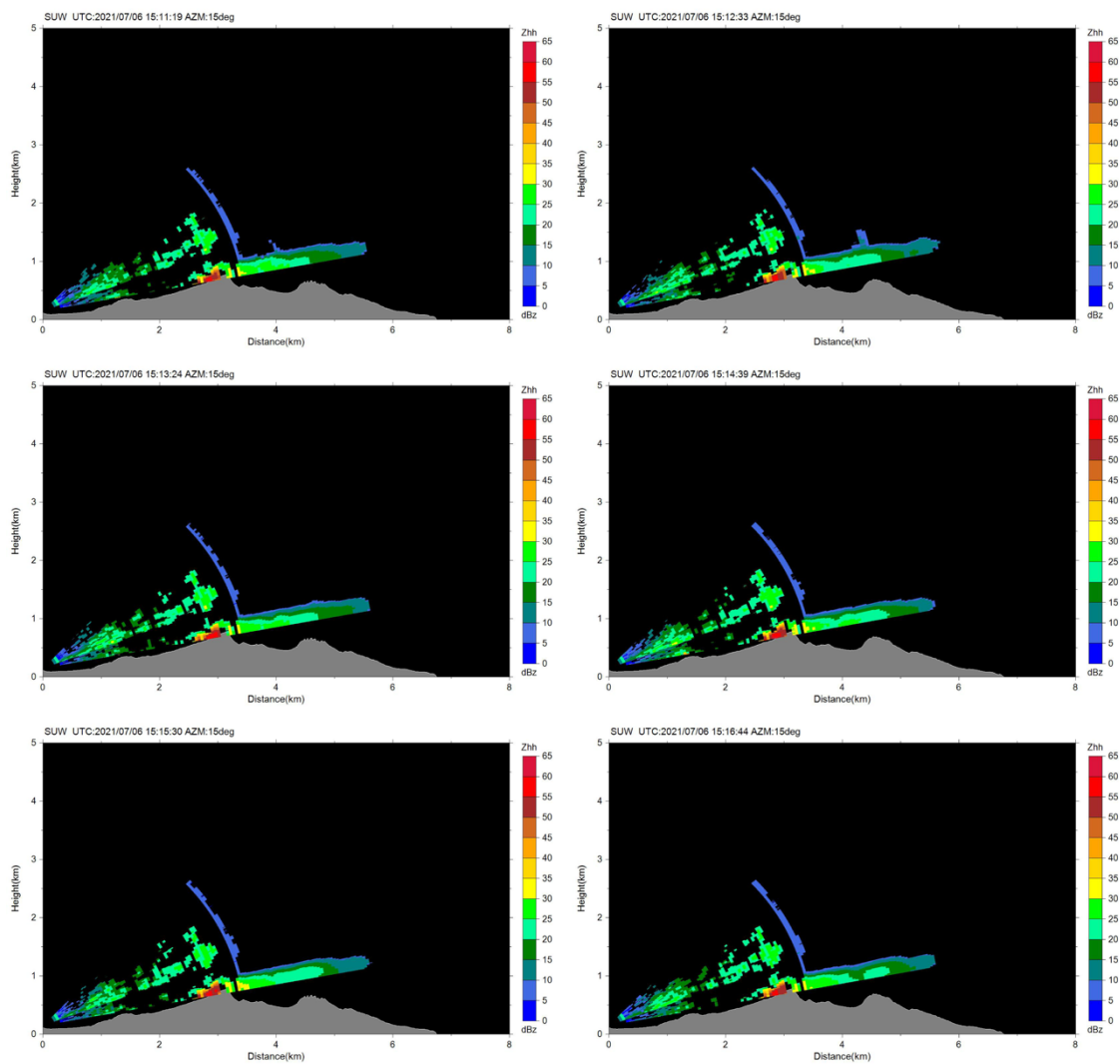


図6 諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2021年7月7日 0:11~0:17 のレーダーによる噴火映像。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。反射強度が 50dBz 超える領域は地形の急峻な部分に対応しているため、地上からの反射の影響と思われる。

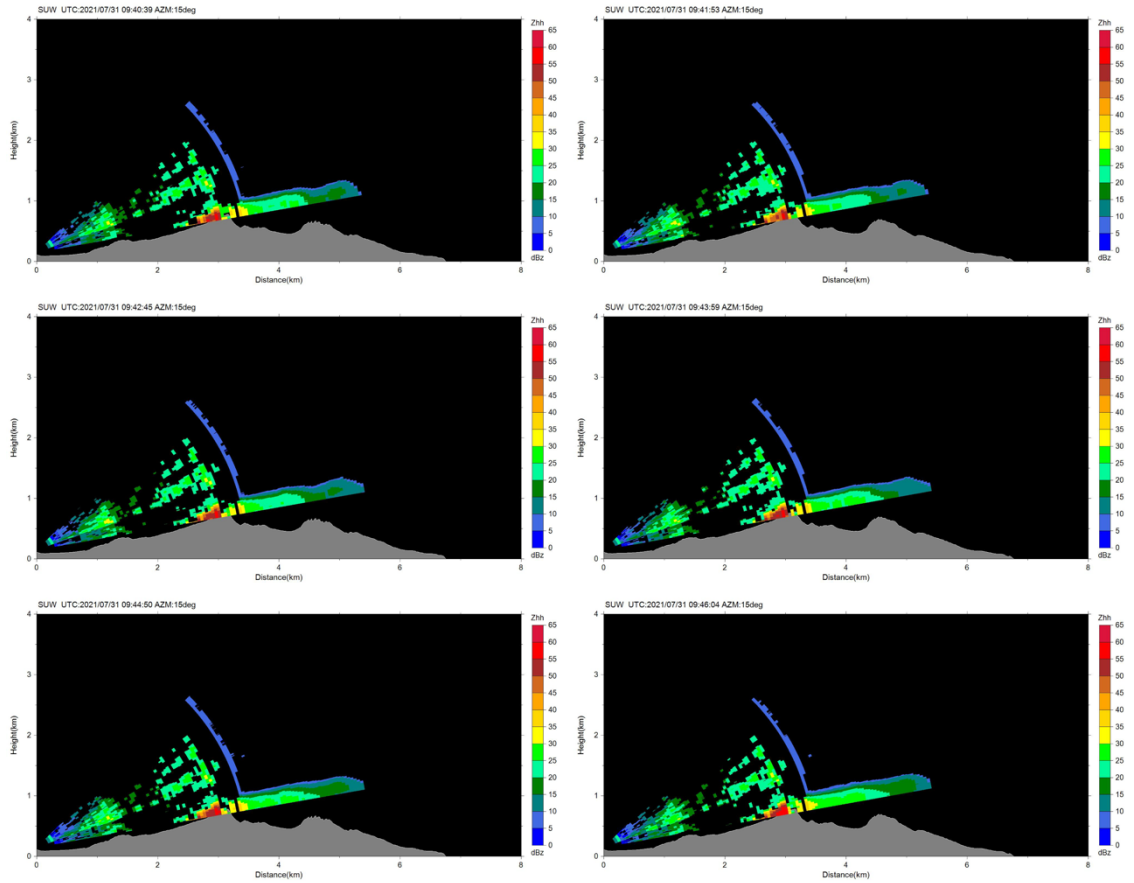


図7 諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2021 年 7 月 31 日 18:40~18:46 のレーダーによる噴火映像。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。反射強度が 50dBz 超える領域は地形の急峻な部分に対応しているため、地上からの反射の影響と思われる。

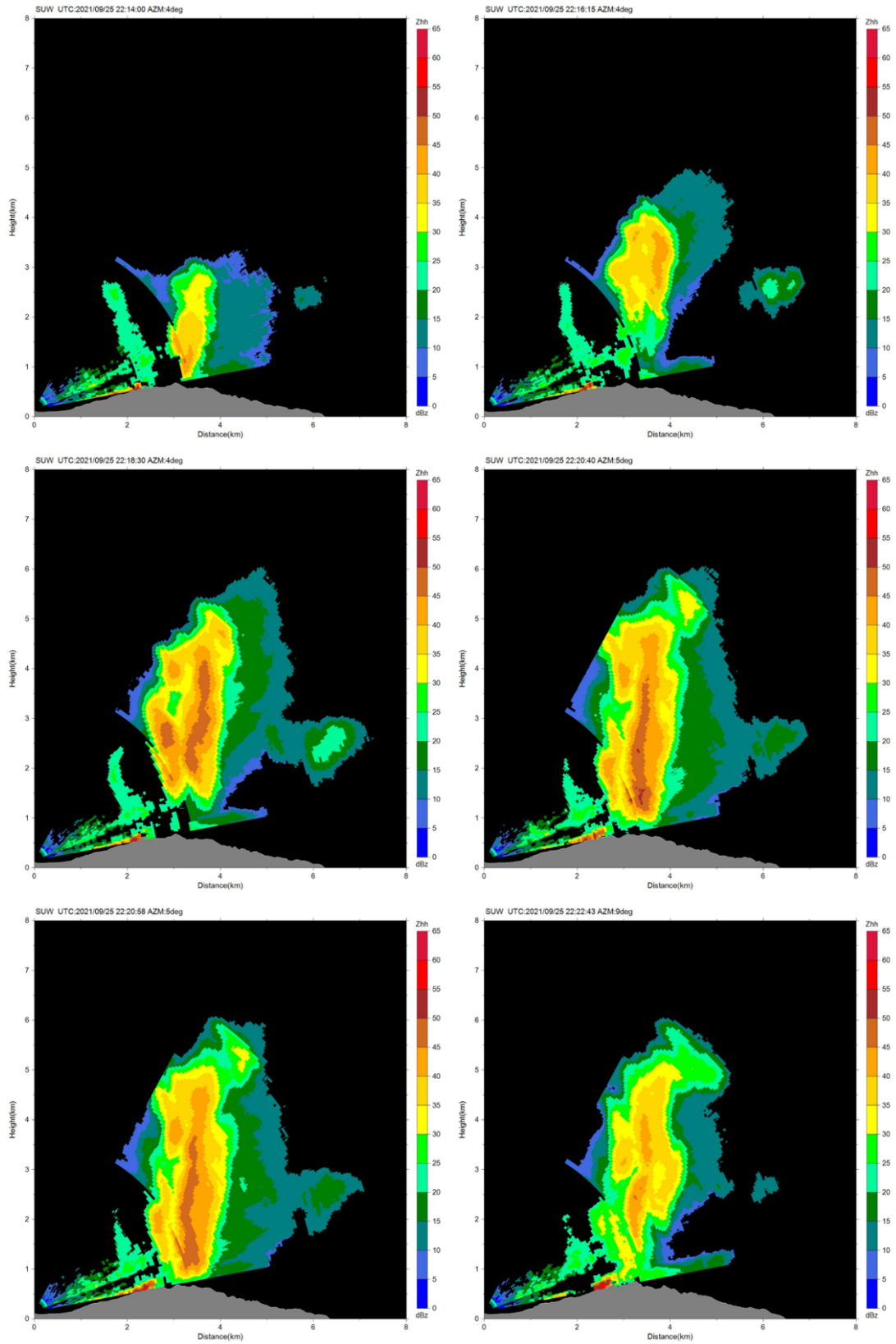


図8 諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2021 年 9 月 26 日 7:14~7:23 のレーダーによる噴火映像。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

レーダー反射強度分布（図 6, 7, 8）は 3 例の噴火であるが、表 6 に示す空振振幅と比較すると、反射強度分布と噴煙形状の有無、噴煙高度や空振振幅の関係を見出すことが出来ない。一般的には、空振振幅が大きい噴火は規模の大きな噴火であるため、噴煙高度も大きい関係があるとされるが、諏訪之瀬島の 2021 年噴火活動においてはそのような関係が成り立つか不明である。そこで、レーダー反射強度の高度プロファイルと気象庁の目視観測による噴煙高度との関係、およびレーダー反射強度の高度プロファイルと空振振幅の関係を調べる。レーダー反射強度の高度プロファイルは、御岳火口の水平位置（東経 129.715°，北緯 29.642°）に固定して、海拔 800 m から 3600 m（2021 年 8 月 28 日 15:50 まで）および海拔 800 m から 6200 m まで（2021 年 8 月 28 日 15:50 から）の高度について 200 m 間隔にて Gressman 補間にて反射強度を抽出し、これを反射強度の高度プロファイルとする。なお、Gressman 補間半径を 500 m とした。2021 年 7 月 3 日から 7 月 16 日、7 月 27 日から 8 月 9 日、そして 9 月 23 日から 10 月 6 日の反射強度の高度プロファイルと噴煙高度の関係と空振振幅との関係をそれぞれ図 9, 図 10 そして図 11 に示す。図 9 において空振振幅が大きい（200Pa 以上の）噴火の多い 7 月 3 日から 7 月 10 日においては、明瞭な反射強度（20dBz 以上）が高度 1000 m 以上には見当たらず、高度 1000 m 未満に 20dBz 程度の反射強度が継続して現れている。一方、7 月 10 日から 7 月 16 日においては、噴煙高度が高く（おおむね 3000 m 以上）、空振振幅が小さい（200Pa 未満の）噴火が卓越しており、この期間には明瞭な反射強度の強さが高い高度まで現れている時間帯が複数ある。なお、7 月 13 日 14 時～15 時と 16 時～17 時の顕著な反射強度は雨雲によるものである。図 10 に示す 7 月 27 日から 8 月 9 日の期間では、空振振幅が小さく、噴煙高度が高い噴火が卓越しており、図 9 と同様に明瞭な反射強度の強さが高い高度まで現れている時間帯が複数ある。図 11 に示す 2021 年 9 月 23 日から 10 月 6 日の期間は、図 8 に示した噴煙高度が海拔 6200 m の 2021 年 9 月 26 日の噴火の発生時間が含まれており、この時間帯における反射強度は海拔 6200 m まで 20dBz 以上である。9 月 27 日の噴煙高度は海拔 3000 m 以下で、空振振幅が 300Pa 以上の噴火が卓越し、高度 1000 m 未満のみに反射強度が 20dBz 以上となっている。これら以外の時間帯においては、噴煙高度は概ね海拔 3500 m 以下で、空振振幅が概ね 200Pa 以下であり、高い高度まで 20dBz 以上となる強い反射強度を示す時間帯は 9 月 28 日と 10 月 1 日には複数あるが、それ以外の日はなかった。

図 9, 10, 11 に示した反射強度の高度プロファイルと噴煙高度や空振振幅との比較についてまとめると以下の通りである。噴煙高度が概ね 3000 m 以上で、空振振幅が概ね 200Pa 以下の噴火が卓越している時間帯においては、反射強度が 20dBz 以上が高い高度まで分布している時間が複数存在する。一方、噴煙高度が概ね 3000 m 以下で、空振振幅が概ね 200Pa 以上の噴火が卓越している時間帯においては 20dBz 以上となる強い反射強度は海拔 1000 m 以下に限定されている。

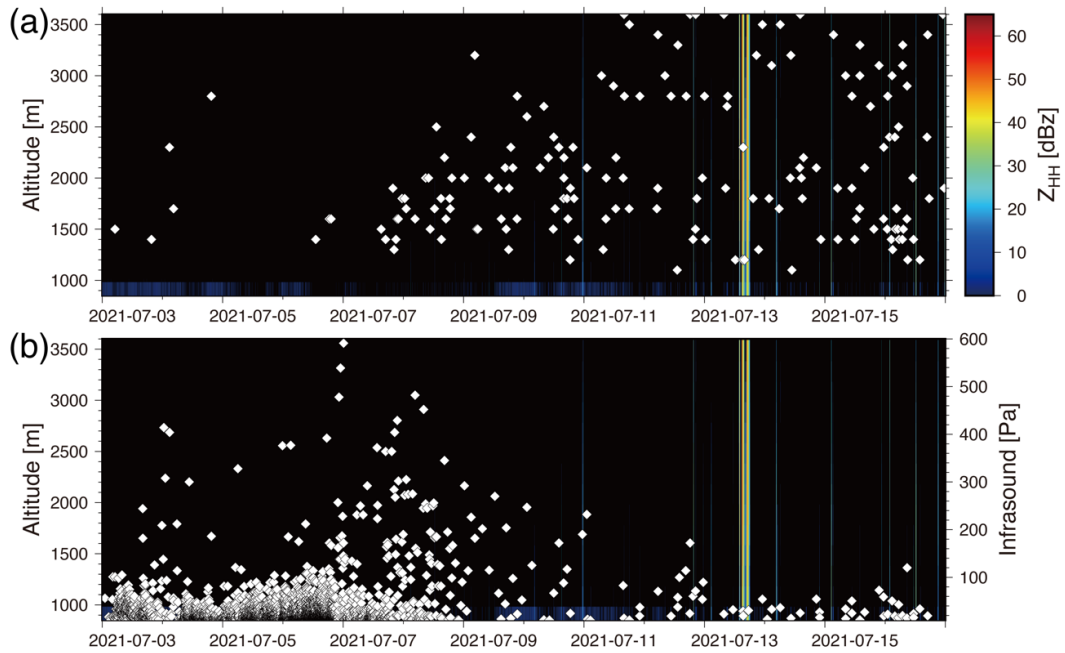


図 9 諏訪之瀬島レーダーの RHI スキャンから得られた御岳火口直上の反射強度の鉛直プロファイル (2021 年 7 月 3 日～7 月 16 日, 時刻は日本標準時)。7 月 13 日 14 時～15 時と 16 時～17 時の顕著な反射強度は雨雲によるもの。(a) 気象庁の目視観測による噴煙高度 (◇) との比較。噴煙高度は海拔高度に変換した値である。(b) SWA 観測点における空振振幅 (◇) との比較。

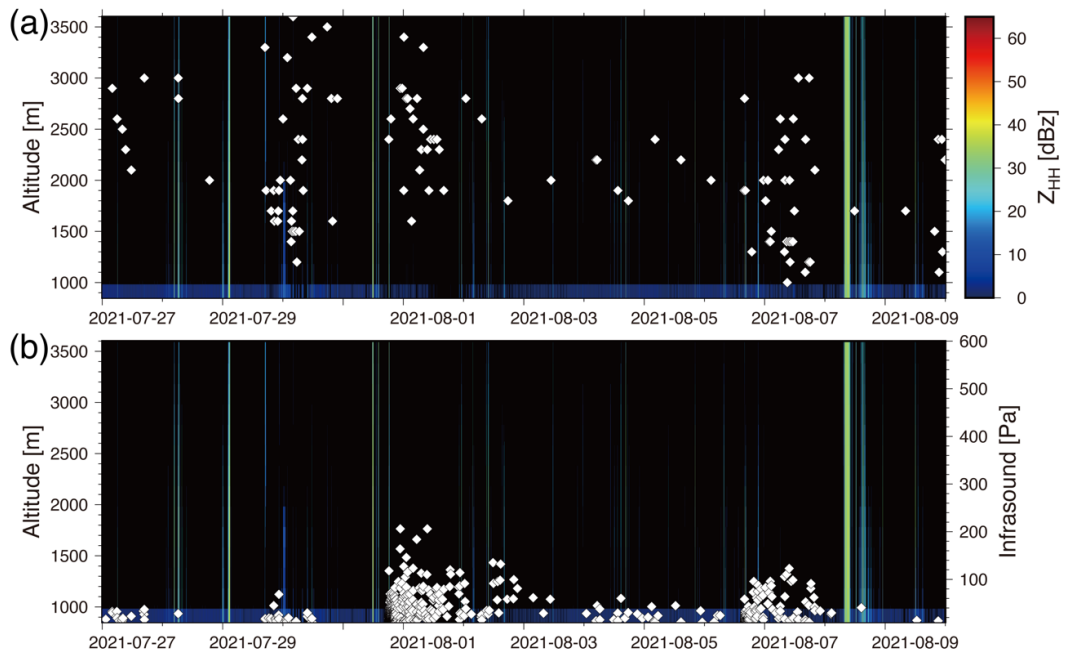


図 10 諏訪之瀬島レーダーの RHI スキャンから得られた御岳火口直上の反射強度の鉛直プロファイル (2021 年 7 月 27 日～8 月 9 日, 時刻は日本標準時)。8 月 8 日 7 時～9 時と 13 時～15 時の強い反射強度は雨雲によるもの。(a) 気象庁の目視観測による噴煙高度 (◇) との比較。噴煙高度は海拔高度に変換した値である。(b) SWA 観測点における空振振幅 (◇) との比較。

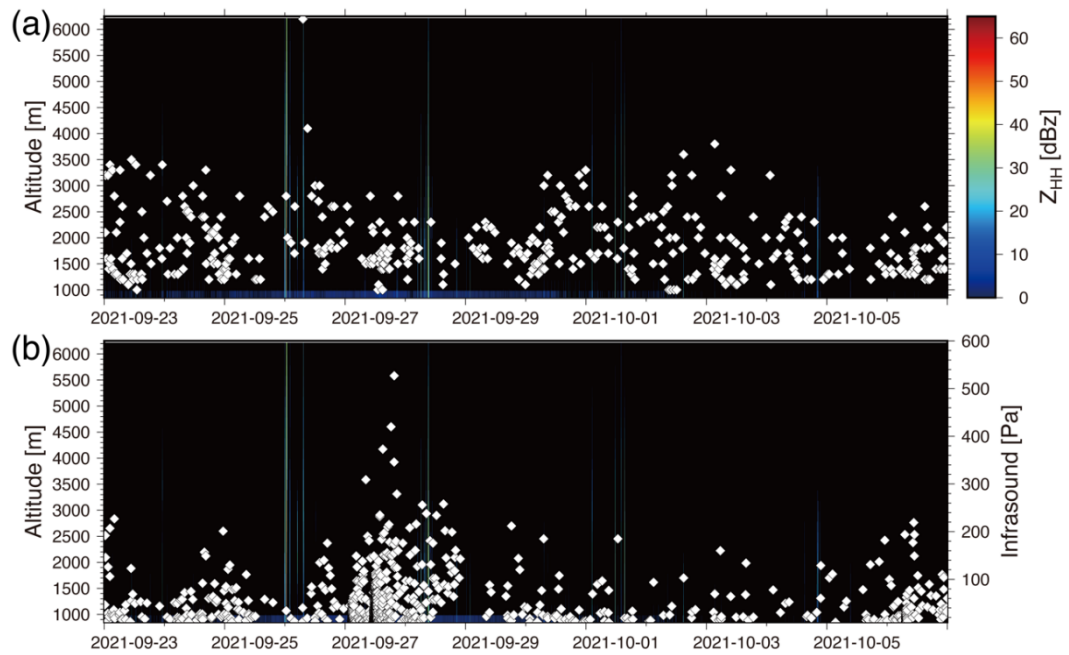


図 11 諏訪之瀬島レーダーの RHI スキャンから得られた御岳火口直上の反射強度の鉛直プロファイル (2021 年 9 月 23 日～10 月 6 日, 時刻は日本標準時)。9 月 25 日 23 時から 24 時の強い反射強度は雨雲によるもの。(a) 気象庁の目視観測による噴煙高度 (◇) との比較。噴煙高度は海拔高度に変換した値である。(b) SWA 観測点における空振振幅 (◇) との比較。

b) ライダー観測

桜島島内に設置した2台のライダーによる火山灰観測を継続した。ライダーで観測可能な火山灰消散係数の上限を決定した上で火山灰消散係数について気候学的解析を行い、大気環境常時監視局データとの照合を行った。火山灰の輸送拡散数値モデルを検証するためのデータセットを引き続き作成するとともに、消散係数と火山灰噴出量の関係を検討した。

i) ライダー稼働状況

桜島火山観測所本館と黒神観測室に設置された2波長偏光ライダーは自動連続運転が可能な仕様となっている。それぞれの地点から南岳火口付近に向けレーザーを射出し、粒子からの後方散乱光を望遠鏡で集光して経路上の粒子分布を遠隔計測する。図12に、令和3年の日毎の観測時間を表示する。両地点とも12月を除きほぼ通年観測が行われ、令和2年よりもデータ取得率が向上した。12月以降の両地点での欠測の理由として、消耗品として交換を行ったレーザー用フラッシュランプの初期不良が疑われたため、メーカーによる調査が行われている。

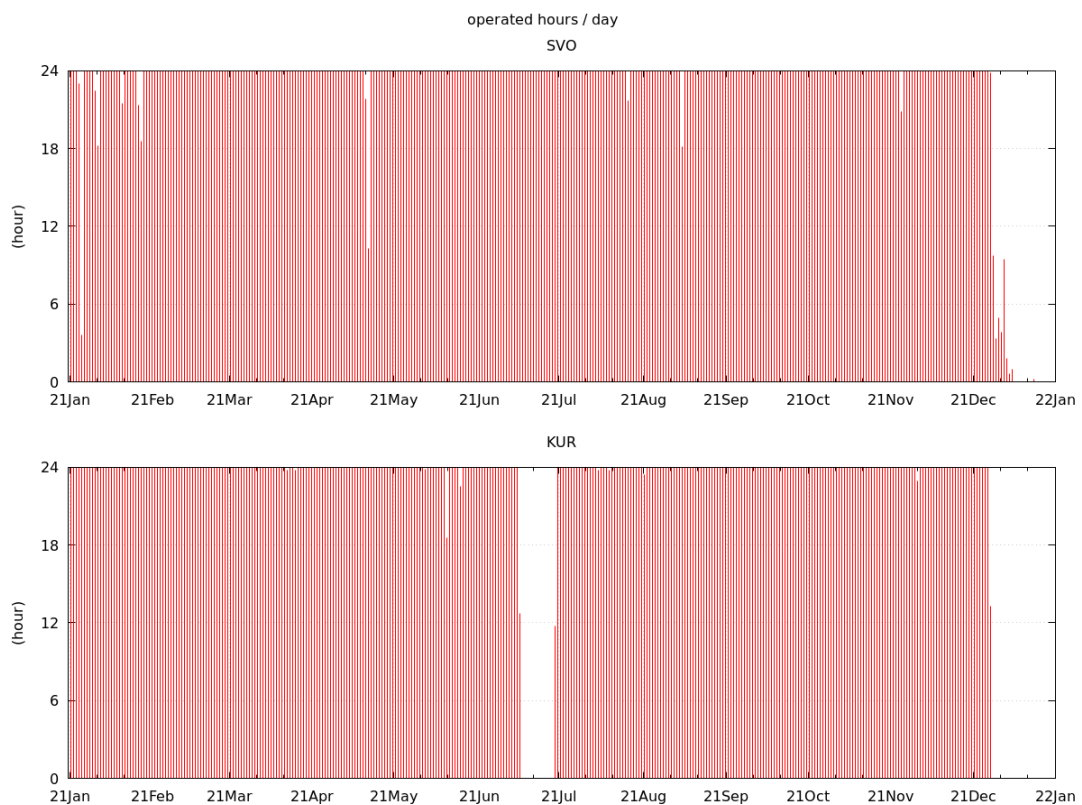


図12 令和3年の観測所本館(上)および黒神観測室(下)における日毎のライダー観測時間

ii) エアロゾル消散係数の季節変化

ライダー観測により得られた視線方向のエアロゾル消散係数を月平均し、鹿児島気象台から公表されている火山情報と対比した(手法は Shimizu et al. (2021) に準ずる)。結果を図13に示す。観測所本館ライダーから得られた消散係数は、火口に

近い 5-6km のレンジにおいて 3-5 月にやや高い値となったほかは年間を通じて低めであった。3-5 月は噴火/爆発が令和 3 年の中では多い方で、消散係数との対応が見られる。手前側のレンジ(4km 未満)では、他の年に見られたようなエアロゾル消散係数の目立った上昇は確認されなかった。

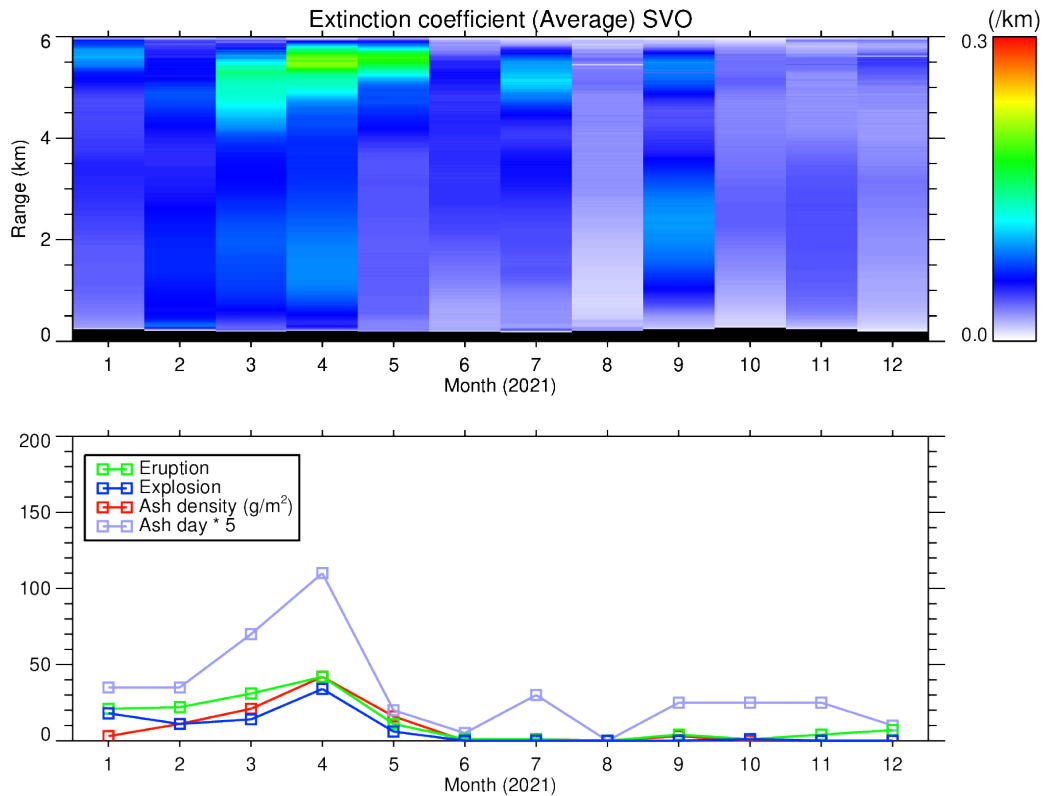


図 13 月平均 532nm エアロゾル消散係数のレンジ方向分布(上)と(下)鹿児島気象台による噴火/爆発回数、降灰日数、降灰量。

iii) ライダーによる消散係数推定の限界

ライダー観測では非常に濃い火山灰の中では送信レーザー光や後方散乱光の減衰が強いために十分な信号強度が得られず、消散係数の推定が困難となる。桜島に設置されたライダーによって消散係数の推定が可能な上限を、2018 年 6 月 16 日の強い噴火を観測した際のデータから検討した。レンジ方向に後方散乱信号強度を微分することにより、簡易的に消散係数を導出することが出来る(スロープ法)。濃い火山灰がライダーに接近してきた 30 分間の消散係数について時間・レンジ領域内での出現頻度分布を求め、その形状から観測限界を検討した。図 14 に、スロープ法から推定された消散係数の時間高度断面と、この範囲内での消散係数出現頻度分布を示す。概ね消散係数 10/km 以上で急激に出現頻度が下がることが見える。この傾向は後方散乱強度のプロファイルに対するレンジ方向のフィルターをより強めると明確になることから、観測データに含まれるノイズの影響を受ける領域と考えられる。

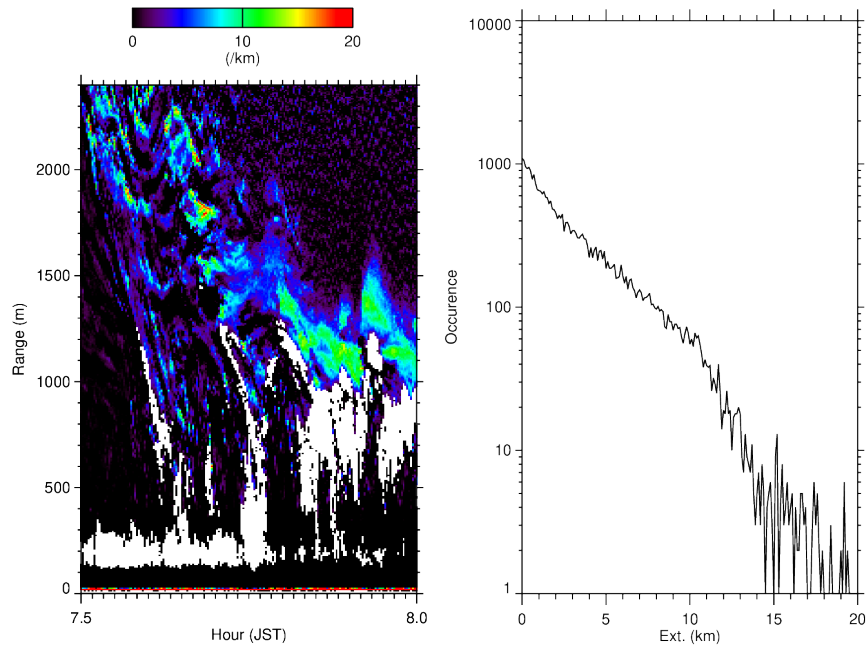


図 14 2018 年 6 月 16 日午前 7 時 30 分から 8 時のエアロゾル消散係数の時間高度断面図(左)およびその出現頻度分布(右)。左図で下層の白抜き部分は、近距離からの強い信号によって AD コンバータの変換レンジ外となり有意な計測値が得られなかった領域。

一方、10/km 以下の頻度分布はフィルターに左右されず、実際の消散係数の情報を含むものと判断できる。この結果から、ライダーによる消散係数の観測上限は 10/km とみなすことが出来る。国内の黄砂イベント時のライダーと TSP を対比した結果 (Shimizu et al., 2011) では消散係数が 1/km の時に TSP 濃度が $1\text{mg}/\text{m}^3$ であることが示されている。黄砂に比べ火山近傍における火山灰では粒経分布が大粒子側に偏っていると考えられるため、消散係数の上限 10/km は質量濃度換算で $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以上とみなすことが出来る。

iv) 地上用簡易火山灰測定装置の評価

令和 2 年度の報告書においてライダーによる消散係数と近隣の大気汚染常時監視局における SPM 濃度との対応がよいことを指摘した。ライダーは火口付近の火山灰を即時検出するために有利であるが、人間生活環境における火山灰濃度を得るために SPM などの地上粒子計測も有用と考えられる。しかしながら地方自治体による大気汚染常時監視局は数が限られており、地上粒子観測地点数を今後独



図 15 (株)mss 製の粒子数計測器。太陽電池パネルと LTE 通信により任意の場所に設置が可能。

自に増やしていくことを念頭に置いて簡易計測装置の評価を行った。図 15 は太陽電池パネルと LTE 通信モジュールを備え、粒子検出部には神栄テクノロジー(株)製の光学式ほこりセンサを利用した粒子数計測計((株)mss 製)である。これを観測所本館に設置し、約 4 ヶ月の観測を行った。ただし、計測計に日光が当たる時間帯には信頼出来る値が得られていない。これを除き、近傍の SPM 濃度と対比した散布図を図 16 に示す。一部のデータを除き、概ね計測粒子カウントと SPM の間で対応が取れている。3 地点の SPM との相関係数は 0.51-0.64 であった。今後は更に長期の観測から対応関係を検証し、日中にもデータが得られるよう遮光を改善するなどした上で、多地点での観測開始を目指す。

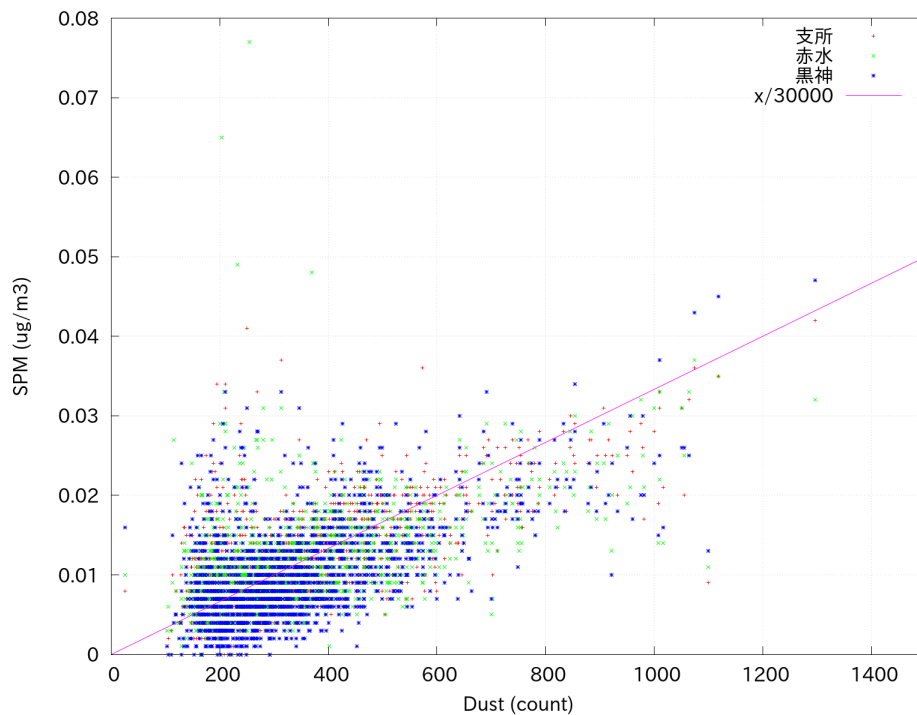


図 16 粒子数計測計(横軸)と 3 地点の SPM(縦軸)との散布図。赤、緑、青がそれぞれ桜島支所、赤水、黒神の SPM を示す。2021 年 12 月 9 日から 2022 年 3 月 31 日までの結果。

v) 今後の計画

2 地点におけるライダー観測を継続してデータ取得を行うことにより、火山灰移流拡散モデルの検証に利用可能なデータセットを作成するとともに、より長期のデータを用いた気候学的解析を行う。簡易計測装置による火山灰の測定値点数を増やす。

c) GNSS 観測

これまでに設置した GNSS による噴煙観測を継続し、解析によって得られる LC 搬送波位相残差及び SN 比の低下について、噴火様式や噴煙に含まれる水蒸気量と関連付けて検討した。

i) LC 搬送波位相遅延量の検討

本年度は 2020 年 8 月 9 日 17 時 05 分の桜島南岳の噴火を対象として、GNSS による噴煙把握能力の検証を特に高いサンプリングレート(1Hz)のデータセットを用いて実施した。使用したパスは、2020 年 8 月 9 日のイベントでパルス状の波形が観測された 7 つのパスである。これら観測点の 1Hz サンプリングの観測データに対して Gipsy-X Ver. 1.0 (Bertiger et al., 2020) 解析ソフトウェアを用いて精密単独測位法 (PPP 法) による通常の測位解析を行い、1 秒毎の各衛星-観測点間の電離層フリー結合 (LC) の搬送波位相遅延量 (Post-fit Phase Residuals, PPR) を得た。図 17 に HARG 観測点における SVN45 に対する PPR の例を、図 18 に UTOG 観測点における SVN74 に対する PPR の例を示す。図 18 を見ると、噴火後に PPR 時系列が急速に立ち上がり、その後漸減した後に、再度急速に PPR の値が小さくなるのが分かる。

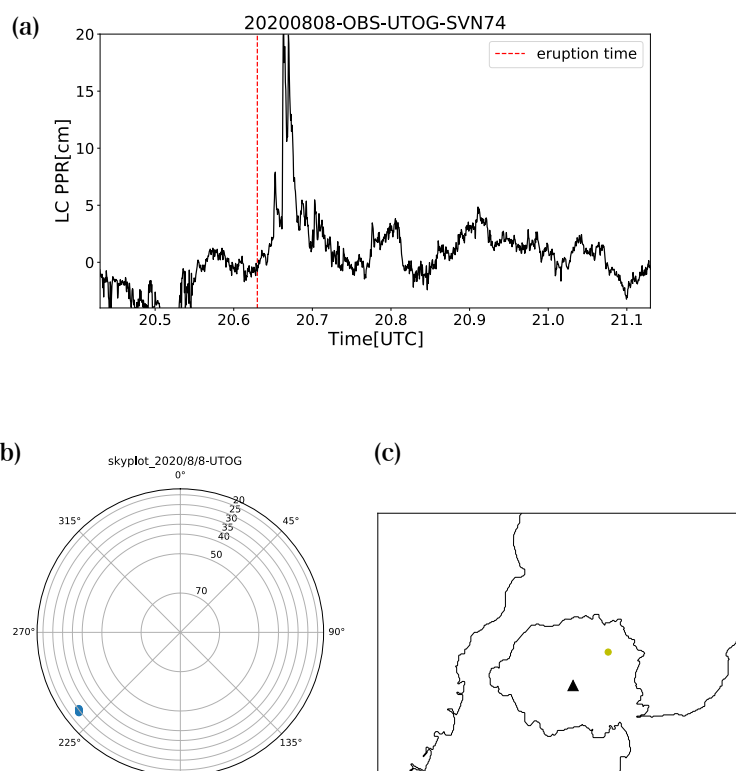


図 17 観測点 UTOG-SVN74 における 1Hz での解析結果。(a) LC PPR の時系列。横軸は時刻 (UTC)、縦軸は LC PPR の値、赤点線は噴火発生時刻、(b) 異常が見えている時刻における衛星の位置のスカイプロット。方位角は北を 0 とする時計周り、仰角は水平を 0 として半径方向で表す。(c) 観測点の位置、▲は南岳。

一方、図 17 では、ピーク状に立ち上がった後、一度その値が小さくなった後に、再度 PPR の値が増加し、その後急減するという傾向が確認された。図 17、18 のいずれにおいても、PPR が異常値を示しているのはその時間にして 2-3 分以下であり、従来の 30 秒サンプリングでは、先に述べたような PPR の時間変化を捉えることは難しい。また噴煙検知で多くの実績を持つ気象レーダーにおいては、全仰角を走査するのに数分以上の時間を必要とする。これらの結果は、GNSS を用いた噴煙検知は、その高い時間分解能を活用することが重要であることを示唆する。

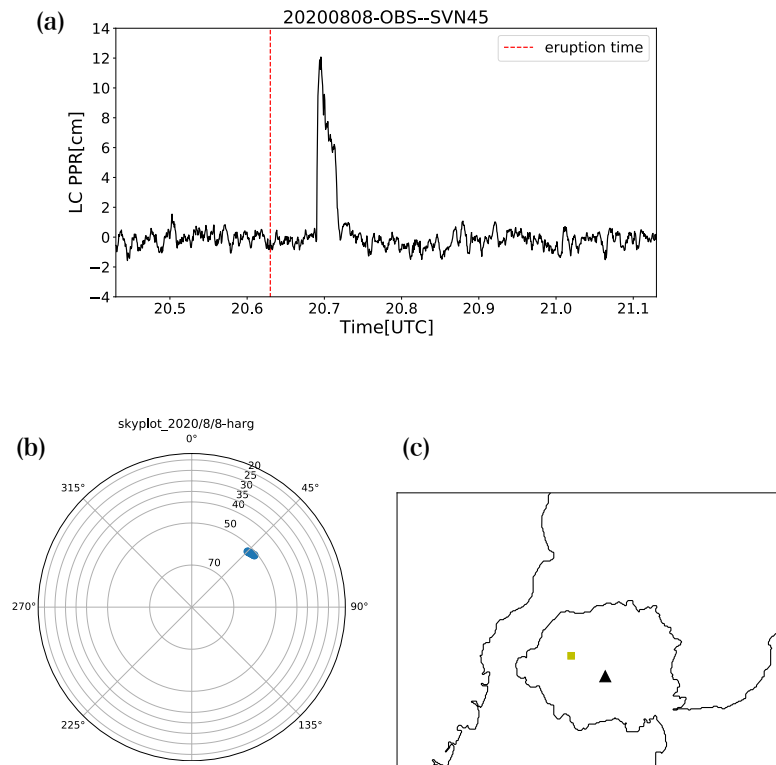


図 18 観測点 HARG-SVN45 における 1Hz での解析結果。(a)LC PPR の時系列。横軸は時刻(UTC)、縦軸は LC PPR の値、赤点線は噴火発生時刻、(b)異常が見えている時刻における衛星の位置のスカイプロット。方位角は北を 0 とする時計周り、仰角は水平を 0 として半径方向で表す。(c) 観測点の位置、▲は南岳。

ii) SN 比の検討

Ohta and Iguchi (2015) では、GNSS-PPR は特に水蒸気量に敏感な量である可能性を示唆していた。一方で、それらの定量評価には同論文では踏み込んだ議論は行っていない。そこで、標高に応じた飽和水蒸気量に基づいた噴煙中の温度上昇について定性的な検討を行った。2012 年 7 月 24 日の南岳噴火を例にした場合、KSHL 観測点と SVN34 衛星の間で最大 240mm の PPR 増大が確認された。同 PPR の増大は南岳付近の上空 4km 程度の情報をサンプリングしてきていることが Ohta and Iguchi (2015) で指摘されている。ここで簡単のために GPS 衛星から観測点の経路中、噴煙柱の中を通過している長さ 0.1km もしくは 1km と仮定すると、その屈折率は 240ppm および 2400ppm となる。上空 4000m の典型的な気圧 ($P_z=4000m = 616hPa$) および気

温 ($T_z=4000\text{m} = 274\text{K}$)、さらにクラウジウス・クラペイロンの式から飽和水蒸気圧 ($e_s=4000\text{m} = 6.6\text{hPa}$)を計算すると、Thayer(1974)の屈折率の定式より定常状態の屈折率を計算できる。今回の場合、定常状態の屈折率はおおよそ 207ppm となる。今回の噴煙によって生じた PPR 増大から計算された屈折率は 240ppm~2400ppm の範囲となる。この噴煙による屈折率の増大を説明するために、温度の上昇による飽和水蒸気量の増大を仮定すると、240ppm の場合で+34K, 2400ppm で+75K の温度上昇で観測値を説明できることが分かる。同試算では搬送波が噴煙柱の中を通過した長さを仮定している。より定量的な水蒸気量の計算を行うためには、トモグラフィ的手法による噴煙柱の形状把握および噴煙中の温度分布等との比較が必要となる。

Ohta and Iguchi (2015)は、2012年7月24日の噴火時に GNSS の SN 比が 2dB 程度低下する場面があることを指摘している。一方で、2013年8月18日16時31分の桜島昭和火口の噴火および、2020年8月9日17時05分の桜島南岳の噴火について、島内の GEONET 観測点を中心として SN 比の低下の有無を調べたが、顕著な低下を確認することはできなかった。SN 比については、受信機の種類によって、その特性が異なる可能性があることがこれまでも報告されている (Bilich et al., 2010)。これら特性の違いが噴煙検出に与える影響を評価するために、桜島島内に設置されている GEONET 0720 観測点の SN 比のデータを確認した。同観測点では、2012年7月24日時点ではトプコン Net-G3 受信機が設置されており、2020年8月9日時点ではトリンプル NetR9 が設置されていた。図 19、20 にそれぞれの日付の SN 比の時系列を全 GPS 衛星分示す。SN 比は衛星の仰角が高くなるほど高くなる一般的な傾向があるが、その特徴は両者で一致する。一方で、SN 比の絶対値が両者では大きく異なる。Net-G3 では 20-30dB/Hz 程度から~50dB/Hz 程度の範囲で比較的明瞭な放物線状の形状を示すが、NetR9 ではその下限が 35db/Hz 程度と高く、~50dB/Hz 程度で頭打ちをしているような SN 比の形状を示す。この比較において、2012年時点ではアンテナは TRM29659.00、2020年時点では TPSCR.G5 と異なるアンテナが設置されており、その厳密な比較は難しいが、両 SN 比の形状の違いは明瞭に認められる。GNSS 受信機ではゲインをコントロールするための機構等がメーカー毎に異なり、そうした受信機内部での制御によってその値、形状が異なっていることが示唆される。また、Bilich et al. (2010)は、トリンプル社製のアンテナにおいて、仰角 60 度程度以上で SN 比が落ちる(dropout) ことを指摘している。図 21 に、2020年8月9日の 0720 観測点における PRN13 衛星の SN 比を示す。これを見ると仰角が高い領域で、SN 比が明瞭に減少していることが確認され、Bilich et al. (2010) が指摘している傾向と類似していることが分かった。これら特徴がそのまま、2020年8月9日の噴火による SN 比減が確認できなかったことと関連しているかは継続した検討が必要だが、少なくとも SN 比を用いる場合、受信機毎の特性を事前に把握した上で活用する必要があることが明らかになった。

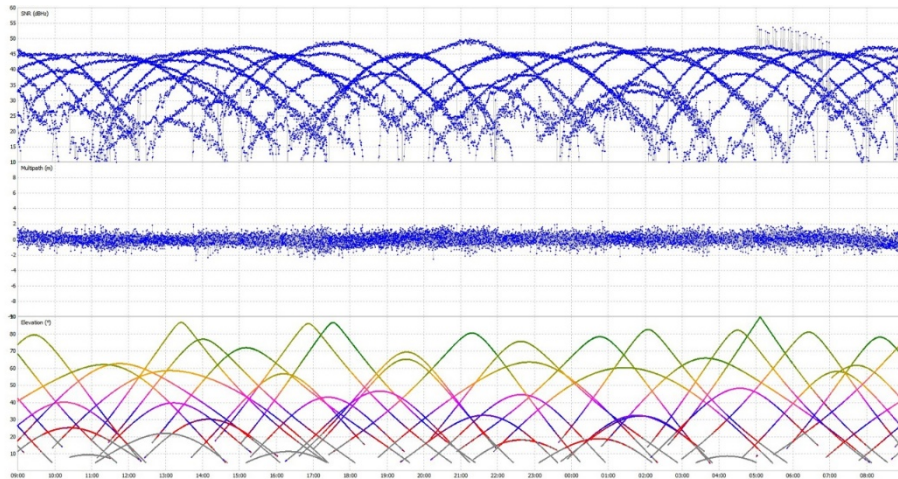


図 19 2012 年 7 月 24 日の GEONET 0720 観測点における L1 シグナルの信号強度。上から SN 比、マルチパス、衛星仰角をそれぞれ示す。

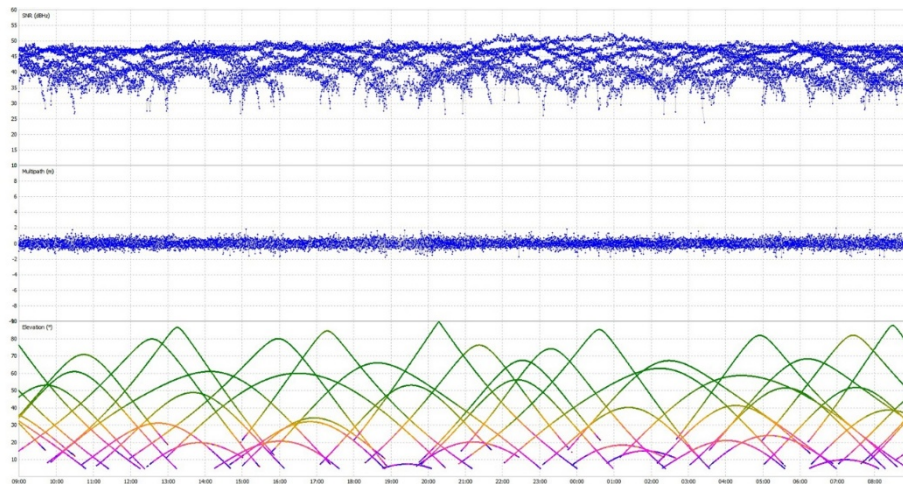


図 20 2020 年 8 月 9 日の GEONET 0720 観測点における L1 シグナルの信号強度。

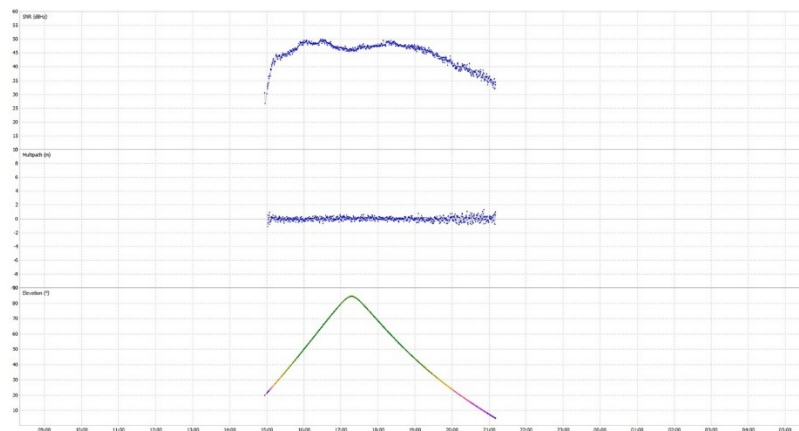


図 21 2020 年 8 月 9 日の GEONET 0720 観測点における PRN13 衛星における L1 シグナルの信号強度。上から SN 比、マルチパス、衛星仰角をそれぞれ示す。

d) ディスドロメータによる地上観測

令和2年度に引き続き、ディスドロメータによる地上降灰量観測を継続した。3) a) i) に記述するように、桜島においては、2021年5月中旬以降、噴火活動が低下した。一方、諏訪之瀬島では噴火活動が繰り返されたので、キャンペーン観測を行った。

i) 観測の概要

令和2年度に引き続きディスドロメータによる地上降灰量観測を行った。観測には降雨観測のために開発された1次元の光学式ディスドロメータ (PARSIVEL², ドイツ OTT Hydromet 社製) を用いた。本装置は落下粒子によってさえぎられる光を計測することによって、粒径ごとに粒子を観測するパーティクルカウンターであり、粒径および落下速度ごとの粒子数を記録する。粒径の測定範囲は0.25mm~26mm, 落下速度の測定範囲は22.4m/s以下である。

ディスドロメータの桜島における位置を図22に示す。各観測点では、時間雨量相当量, 粒子数, センサーの温度, 電源電圧に加え, 粒径毎の30クラスと落下速度毎の32クラス, 合計960クラスに分けた粒子数が1分毎に記録される。いずれの観測点もオンラインによるデータ取得が可能である。他のプロジェクトにより設置したものを合わせて21台のディスドロメータが桜島において稼働している。

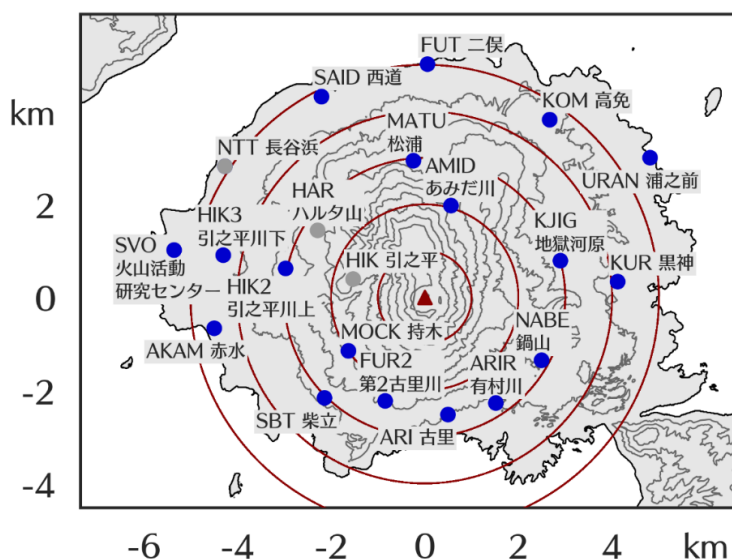


図22 桜島におけるディスドロメータの位置図。青丸は本プロジェクトにおいて設置した観測点, 白丸は他のプロジェクトにおいて設置した観測点。赤三角は南岳 A 火口の位置を, 赤線は南岳 A 火口から1kmごとの同心円を示す。

ii) 諏訪之瀬島における降灰量キャンペーン観測

活動が活発だった諏訪之瀬島の御岳火口から南に位置するGPS観測室(図23)前にディスドロメータを設置して降灰量のキャンペーン観測を行った(図24)。2021年3月8日から10日にかけて, また11月1日に, ディスドロメータで降灰が検知され, 同時に降灰粒子のサンプル採取を行った。ディスドロメータでの観測結果は, 前年度の報告書 d) ii) で求められた換算式により降灰重量に換算され, サンプル採

取により求められた降灰重量と比較された。4回の降灰イベントのうち3回では、デイスドロメータから求められた降灰量がサンプル降灰量の2倍以内の精度で求められた一方で、3/9 17:15-3/10 8:00の降灰イベントでは、デイスドロメータにおける降灰量がサンプルから求められた降灰量よりもはるかに過小になった(表4)。3回のイベントでは、ほとんどの粒子が重量の計算対象となる粒径-落下速度区間に収まっている(図25a, b, d)一方で、過小となったイベントは、計算対象の速度上限よりも速い速度で降下した粒子が多数検知されていて(図25c)、このことが過小評価の原因となったと考えられる。こうした傾向は、昨年度までに解析された桜島での降灰イベントでも見られた。異なる火山での噴火による降灰でも、昨年度に求められた経験的な降灰量の換算式が適用できることが示唆された一方で、換算式に改良の余地があることも再確認された。



図 23 降灰サンプルを採取した観測点の位置図。3地点のうちGPS観測室(図中「GPS」)にデイスドロメータを設置し、降灰採取との同時観測を行った。



図 24 11月1日14時51分にGPS観測室で撮影された噴煙。

表 4 サンプル降灰量とディストロメータ降灰量の比較

採取時刻	サンプル降灰量 (g/m ²)	ディストロメータ降灰量 (g/m ²)
2021/3/8 15:55-16:00	8.53	10
2021/3/8 16:33-16:36	10.5	6
2021/3/9 17:15-3/10 8:00	22.7	3
2021/11/1 14:58-15:05	160	121

※サンプル降灰量は諏訪之瀬島 GPS 観測室前で採取した火山灰、ディストロメータ降灰量は、粒子の落下速度と粒径を用いた経験式から求めた。

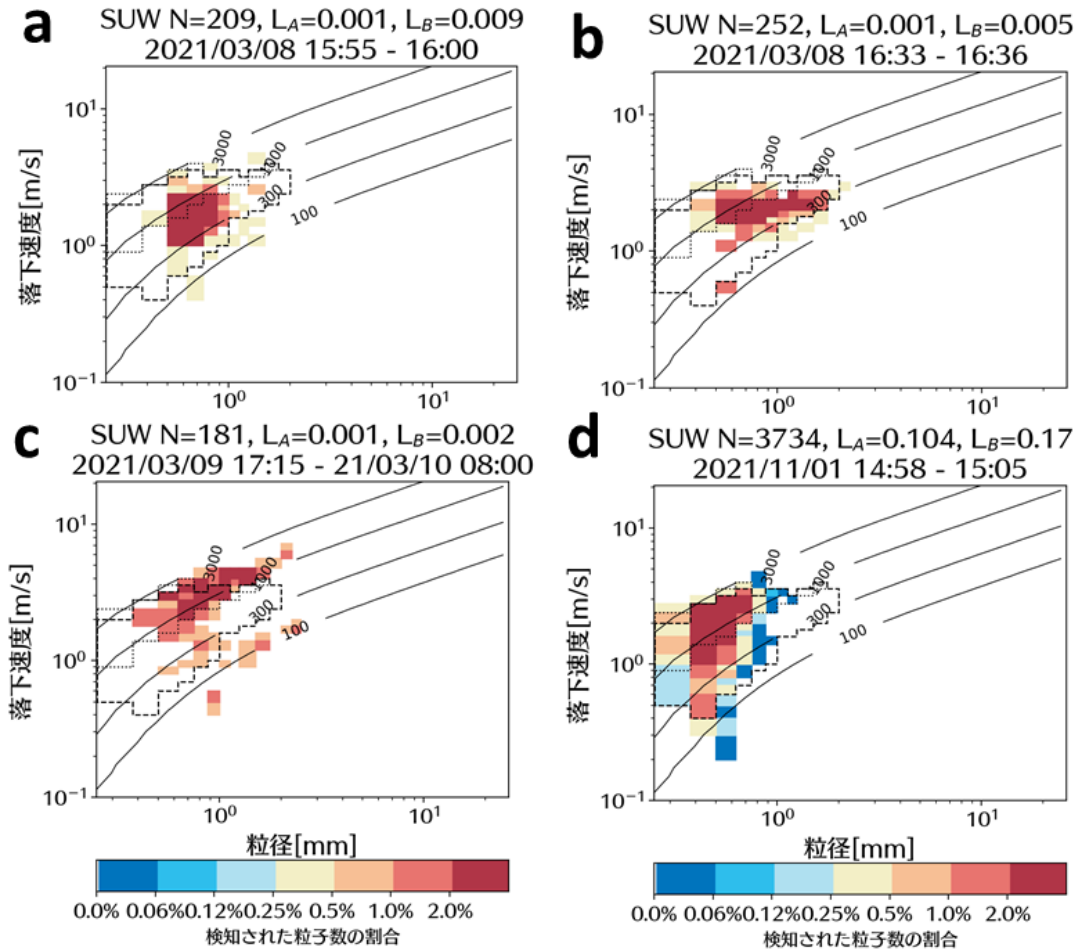


図 25 GPS 観測室前で計測された降灰粒子の粒径—落下速度分布。N は総粒子数，L_A，L_B はそれぞれ，経験的な換算式から求められた，0.25mm 以上，0.25mm 以下の粒子重量。点線と破線はそれぞれ 0.25mm 以上，以下の粒子重量の計算対象区間で，等値線は粒子の実効密度を表す。a) 2021 年 3 月 8 日 15 : 55—16 : 00、b) 3 月 8 日 16 : 33—16 : 36、c) 3 月 9 日 17 : 15—3 月 10 日 8 : 00、d) 2021 年 11 月 1 日 14 : 58—15 : 05。

iii) 降灰量の時間変化

これまでと同様に、検知された粒子の中から降灰によるイベントを抽出し、さらに、明らかにノイズと考えられるものを除去した。2021年に発生した噴火のうち、噴煙高度2500m以上に達したものについて、令和2年度の報告書d)ii)にて求めた経験式から計算されたディストロメータの降灰量と、有村観測坑道において計測された地震動の振幅を比較して、図26, 28に示す。いずれの噴火も南岳山頂火口において発生したものであるが、これらの噴火は空気振動や弾道岩塊の放出を伴うブルカノ式噴火と噴煙の上昇のみを伴う非ブルカノ式噴火に分けられる。ここでは、ブルカノ式噴火を爆発（図中では「ex」と表記）とし、非ブルカノ式噴火は単に噴火（図中では「er」と表記）とする。なお、噴煙高度2500m以上に達した噴火はいずれも降灰と同時に降雨が見られなかった。

水平一様な風速場において火口から火山灰粒子が移流するとすれば、火山灰は風下においてのみ検知される。1回の単発の噴火に対応して、1つの観測点のみで検知される場合が最も多い。噴煙高度2500m以上の比較的規模の大きい噴火でも、2021年5月6日23:22に発生した、高度2500m以上の噴煙を伴う噴火など、1つの観測点での検知にとどまることもある。この噴火では、AMID観測点のみで降灰が検知された（図28c）。

1回の噴煙放出に対し、隣接する2つの観測点において火山灰が検知されることもよくある。こうした噴火は規模が大きくなるほど増え、観測期間中では、2021年3月9日22:26に発生した、高度2700mの噴煙を伴う噴火や、翌10日15:20に発生した2500mの噴煙を伴う噴火が、それぞれNABE, ARIR観測点とMOCK, SBT観測点と、2つの観測点に降灰をもたらした（図26b, 26c）。また、同じ方位に距離の異なる2つの観測点を配置したことで、距離による到達時刻や量の違いを計測できた例もある。2021年3月27日2:36に発生した、噴煙高度3200mの噴煙を伴う爆発では、火口からの距離が近いほど、噴火開始から降灰検知開始までの時間が短かった。火口から相対的に近いMATU観測点では少量の降灰しか検知されなかった一方で、相対的に遠いSAIDやFUTでは多量の降灰が検知された（図26d）。落下速度ごとに粒子数の頻度分布の時間変化を見てみると、MATU観測点では最も早い時間に落下速度の速い粒子が少数検知されている一方、FUTやSAIDでは幅の広い落下速度の粒子が多数検知されている傾向が見られ、特にSAIでは時間とともに落下速度の最頻値が小さくなっていく様子が見られた（図27）。この噴火で遠くの観測点での降灰量が多かったのは、滞空時間が長い細流粒子が多量に遠方の観測点で検知されたからだと思われる。

風速場が水平一様でなかったり、高さによって大きく異なったりする場合には、火口から見て広い方位に位置する観測点で降灰が検知される。2021年3月6日23:45に発生した噴火では、2700m以上の噴煙を伴う噴火が発生し、KJIG, AMID, MATUの3観測点で降灰が検知された（図26a）。2020年3月30日4:33（図28a）に発生した噴煙高度2700mの噴火では、KUR, ARIR, ARIの3観測点で降灰が検知された。ARIRとARIに関しては主要な降灰検知が噴火開始から3時間以上経過しており、噴

火開始時に放出された火山灰が降下したというよりも、それに続く連続的な火山灰放出によってもたらされた火山灰粒子が降下したと考えられるものの、噴火前後での顕著な振幅変化は見られなかった。

こうした火山灰連続放出が地震動振幅の変化から窺えることもある。2021年4月5日6:41の噴火では、噴火開始後から数時間にわたり振幅の増加傾向が見られ、火山灰連続放出があったと考えられる。各観測点での降灰量の時間変化から、噴火開始直後に放出された火山灰が検知されたのはARI, FUR2観測点で、それに続く連続放出で放出された火山灰が検知されたのはARI, MOCK, KJIG観測点だと考えられる(図28b)。

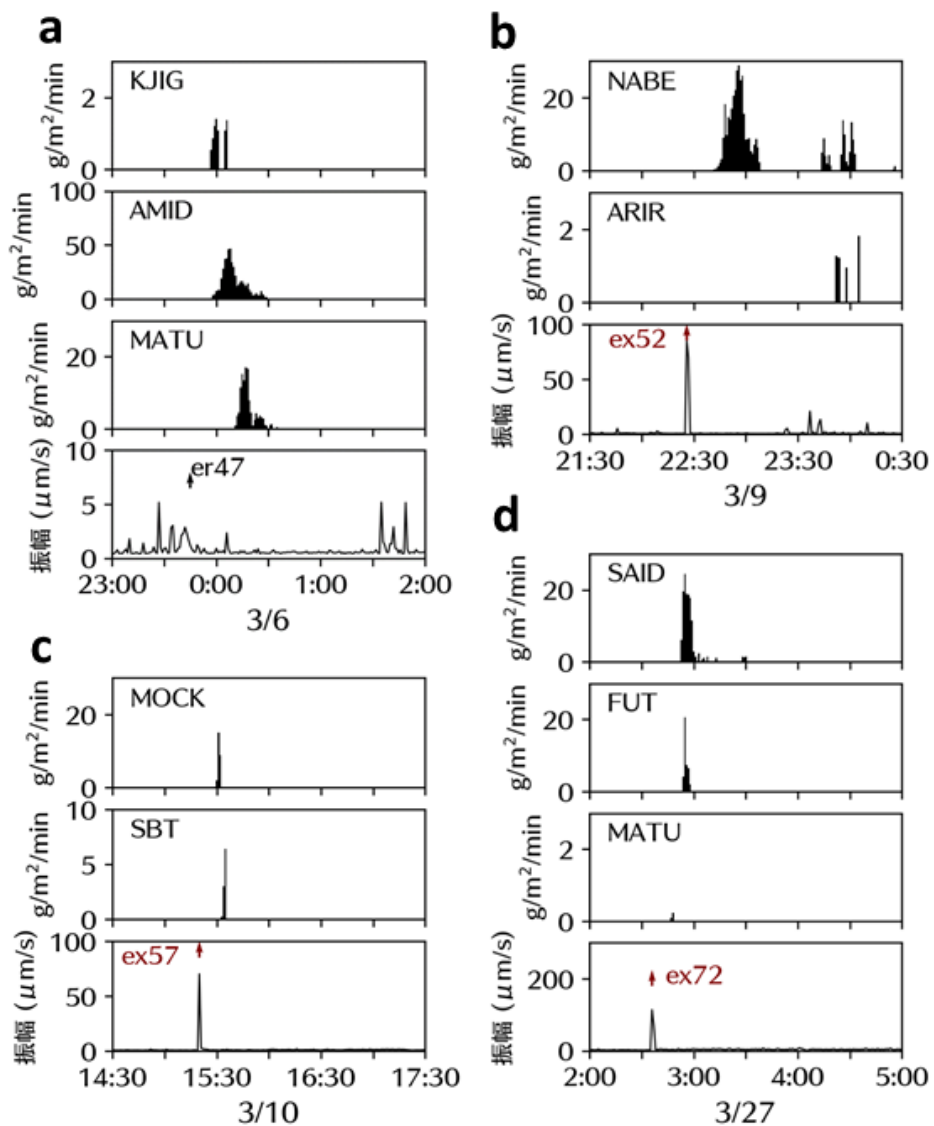


図 26 ディストロメータにより観測された降灰量と地震動振幅の時間変化の比較。上向きの矢印は爆発を表す。a) 2021年3月6日の噴火、b) 2021年3月9日の爆発、c) 2021年3月10日の爆発。d) 2021年3月27日の爆発。

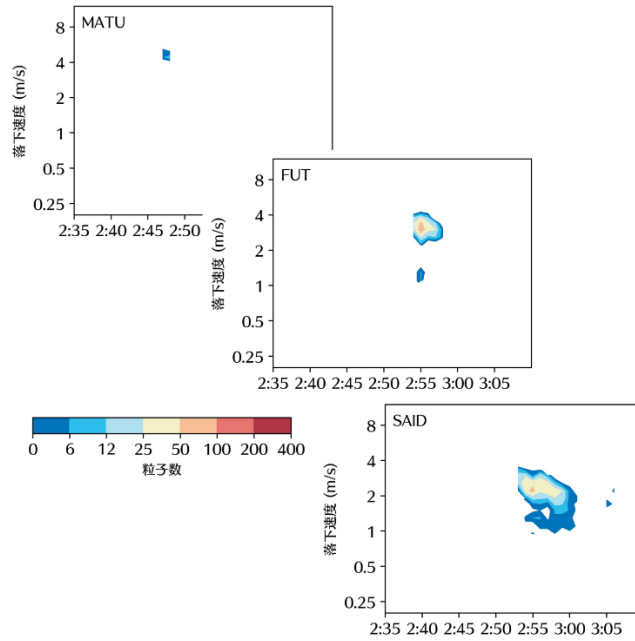


図 27 MATU、FUT、SAID 観測点においてディストロメータにより観測された火山灰粒子の落下速度の頻度分布時間変化。2021 年 3 月 27 日噴火。

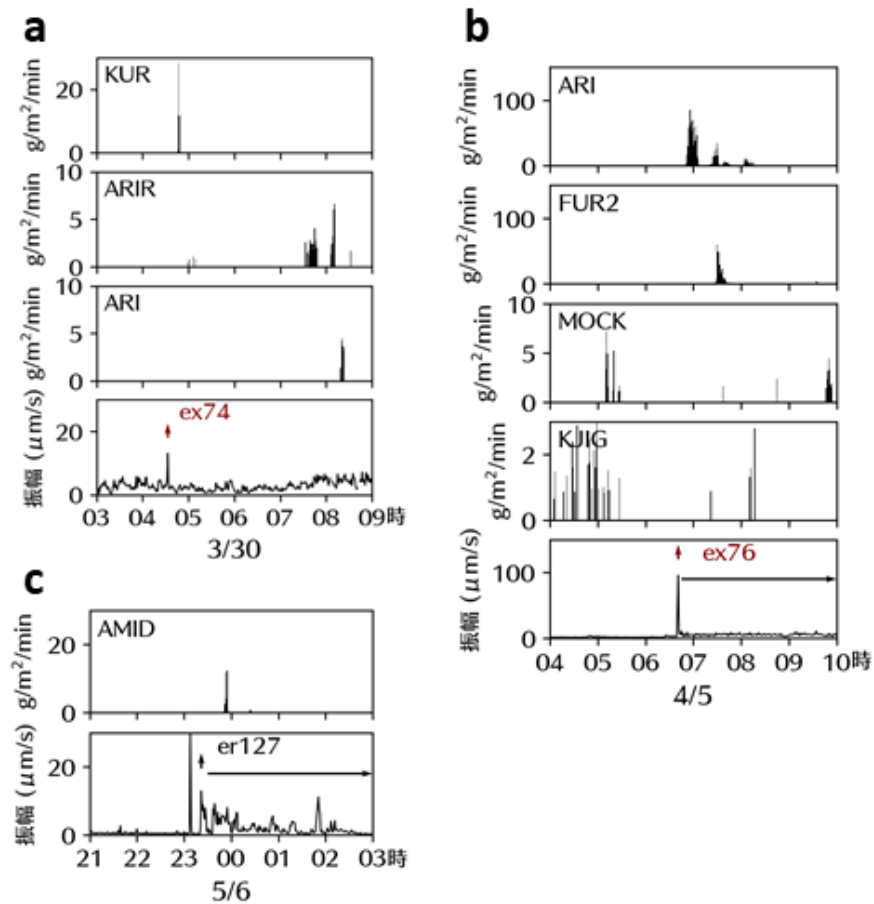


図 28 ディストロメータ観測から推定された降灰量と地震動振幅の時間変化の比較。上向きの矢印は爆発を、右向きの矢印は火山灰連続放出を表す。a) 2021 年 3 月 30 日の爆発、b) 2021 年 4 月 5 日の爆発、c) 2021 年 5 月 6 日の噴火。

e) レーダー観測による火山灰推定の高度化

レーダによる降灰量推定は、いわゆる RA-ZA 関係式 (RA は降灰強度、ZA はレーダ反射因子) を用いておこなわれる。RA-ZA 関係式を求める方法として、実際に観測された降灰量とレーダ観測値の間の経験式を求める方法 (工学的な方法) が用いられてきた (真木・他、2019)。近年、京都大学防災研究所は、桜島に展開された計 21 台の光学式ディストロメータ (Parsivel²) を展開し、落下する火山灰粒子の粒径分布の観測データを蓄積している。粒径分布の情報が得られると、散乱計算から理論的な RA-ZA 関係式を導出すること (理学的な手法) が可能になる。Maki et al. (2021) は、ディストロメータで観測された顕著な 6 噴火事例の粒径分布の情報から、理論的な RA-ZA 関係式を求めた (令和 2 年度報告書)。求められた RA-ZA 関係式は噴火事例によって変動した。この変動は、レーダによる降灰量推定の誤差の原因となるために、その理由を明らかにする必要がある。このため、今年度は、2018 年から 2020 年の 3 年間に発生した、噴煙高度が 1000m 以上の噴火事例 (計 801 事例) のディストロメータの観測データを抽出した。ここでは、抽出条件、抽出方法、抽出されたデータの解析方法について述べる。最後に解析結果の一例を紹介する。RA-ZA 関係式の変動の本格的な解析は令和 4 年度を予定している。

i) 降灰データの抽出

図 29 にディストロメータの観測データの処理手順を示す。処理手順は、大きく分けて【観測 PSD データの編集】、【解析用 PSD データの抽出】、【抽出条件ファイルの作成】がある。なお、PSD は Particle Size Distribution (粒径分布) の略である。

【観測 PSD データの編集】では、まず、データ収録フォーマットをチェックし修正する。これは、21 台のパーシベルの中にはフォーマットが異なるものがあるため、自動でフォーマットをチェックし修正するプログラムを作成した。次に、Parsivel2 の観測データを管理する都合上、各観測点の 1 年間分のデータを 1 つのファイルに編集する。編集されたデータを「年間 PSD データ」と呼ぶ。「年間 PSD ファイル」には降水粒子のデータやノイズデータ等が含まれているので、次の【解析用 PSD データの抽出】が必要となる。

【解析用 PSD データの抽出】は、「年間 PSD ファイル」から降灰粒子のデータを抽出する作業である。抽出に当たっては、【抽出条件ファイルの作成】で用意した「噴火リスト」を参考にする。「噴火リスト」は、鹿児島地方気象台で作成される桜島噴火情報 (噴火時日時、噴煙高度、噴煙の向きなど) と国交省の垂水 XMP で観測されたレーダエコーの情報 (降雨エコーの有無、エコー分布の特徴など) が記載された csv ファイルである。「噴火リスト」を参考にして「年間 PSD データ」から抽出される PSD データを「噴火 PSD データ」と呼ぶ。抽出は、matlab スクリプト 'scr_parsivel_retrieve_iku.m' により自動的におこなわれるが、その際、次の条件が満たされるようにデータが抽出される (図 30 参照)。まず、「噴火リスト」に記載された噴火時刻 (TE) から、初めて PSD データが観測された時刻までの時間を Δt_1 とし、 Δt_1 が 1 hour (デフォルトは 1 hour) 以内の場合、そのデータは降灰粒

子のデータと判定し、抽出開始時刻を決定する。抽出終了時刻は、データが連続して Δt_2 時間以上（デフォルト値は $\Delta t_2=10$ min とする）観測されない期間の最初の時刻とする。「噴火 PSD データ」のフォーマットは「年間 PSD データ」のフォーマットと同じである。

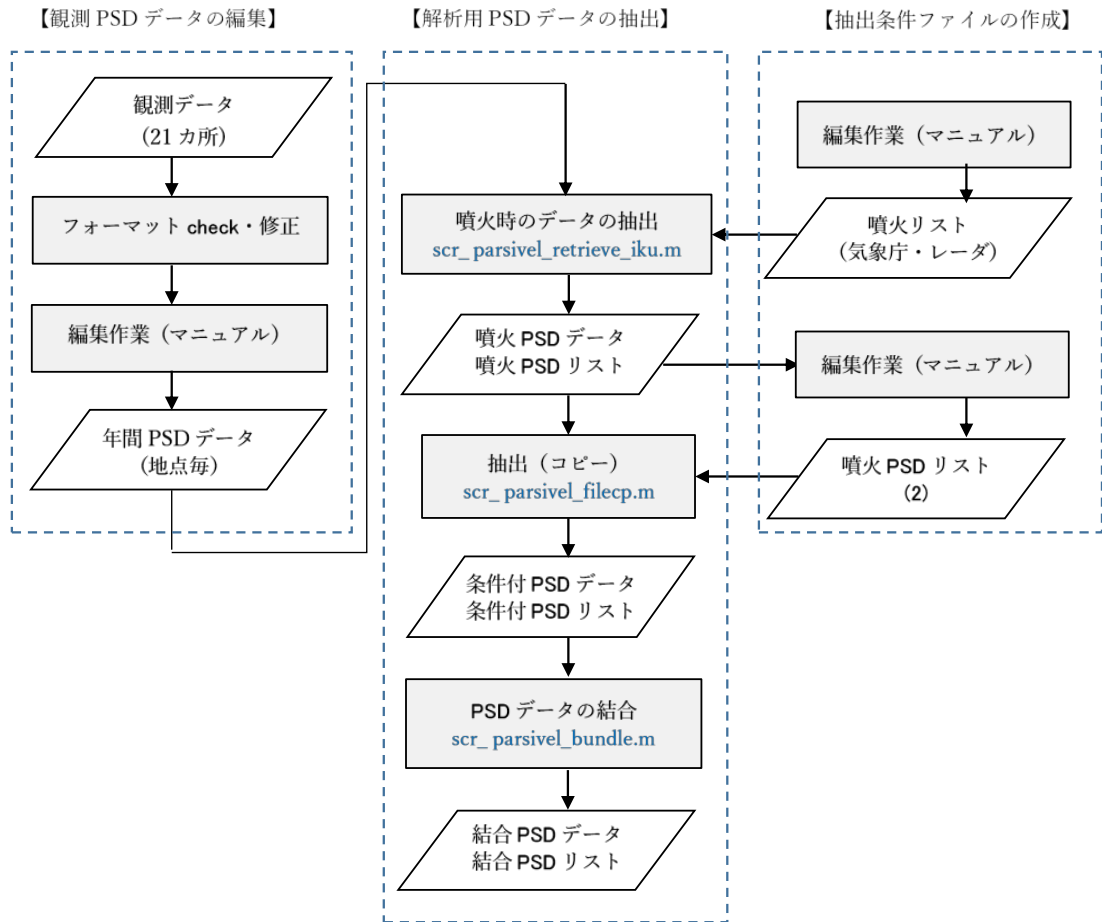


図 29 光学式ディストロメータ (Parsivel²) により観測された粒径分布データから降灰時のデータを抽出する手順。

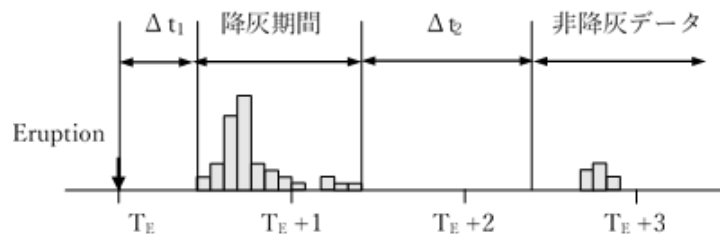


図 30 降灰の開始と終了の定義を説明する模式図。TE は噴火時刻、 Δt_1 と Δt_2 はそれぞれ PSD データの記録がない時間。

注意すべき点は、このようにして抽出されたデータには降水データが混在している可能性があるため、「噴火 PSD データ」＝「降灰 PSD データ」とは言えない。収録データが降灰データだったとしても、更に、降灰データが記録されていたとしても、

ディストロメータの位置が降灰域の境界付近だった場合、記録されている時間が短かくデータの代表性が失われている可能性がある。このようなデータは解析対象から取り除く必要がある。

「噴火 PSD データ」から解析に必要な降灰データのみを取り出すスクリプトが、`'scr_parsivel_filecp.m'` である。選定されたデータを「条件付 PSD ファイル」と呼ぶ。選定に際しては「噴火 PSD リスト 2」を参考におこなわれる。「噴火 PSD リスト 2」は、「噴火 PSD データ」と一緒に作成される「噴火 PSD リスト」を手作業で編集して、不要なデータを削除したファイルである。選択できる条件として、年、観測点、噴煙高度、降灰観測時間、降雨の有無、降灰分布パターンがある。解析結果は「噴火 PSD リスト 2」の正確さに依存するために、「噴火 PSD リスト 2」の作成にあたっては十分に注意する必要がある。なお、「条件付 PSD データ」のフォーマットは「年間 PSD データ」、「噴火 PSD データ」のフォーマットと同じである。

プログラム `'scr_parsivel_bundle.m'` は `'scr_parsivel_filecp.m'` により選定された「条件付 PSD データ」を結合するスクリプトで、結合されたデータを「結合 PSD データ」と呼ぶ。「結合 PSD データ」は、全期間、全地点、全噴煙高度などのデータを解析してその統計値を求めたい場合に利用される。「結合 PSD データ」のフォーマットは「年間 PSD データ」、「噴火 PSD データ」、「条件付 PSD データ」のフォーマットと同じである。

ii) 降灰 PSD データの解析プログラム

図 31 は抽出された降灰 PSD データの解析手順と得られる結果を説明する流れ図である。降灰粒子の粒径分布 (PSD) の特徴を明らかにすることと定量的降灰量推定式を求めることを目的としていくつかのプログラムを作成した。プログラムは、本報告書の ii) 降灰データの抽出で述べた「噴火 PSD データ」、「条件付 PSD データ」、「結合 PSD データ」のいずれかを入力データとし、1 分毎の PSD、落下速度、ガンマ PSD パラメータ、積分パラメータ等を求めて図化する。更に、PSD パラメータ間の相関解析から RA-ZA 関係式などの降灰量推定式を求める。図の各プログラムの名称と機能を表 5 にまとめた。`'scr_parsivel_dpri.m'` は、PSD データの解析の中心となる matlab スクリプトファイルである。プログラム名の最初に `'f_'` が付いているプログラムは、`'scr_parsivel_dpri.m'` の中で呼び出される関数ファイルである。PSD パラメータを求めるアルゴリズムの詳細は Maki et al. (2020) を参照。

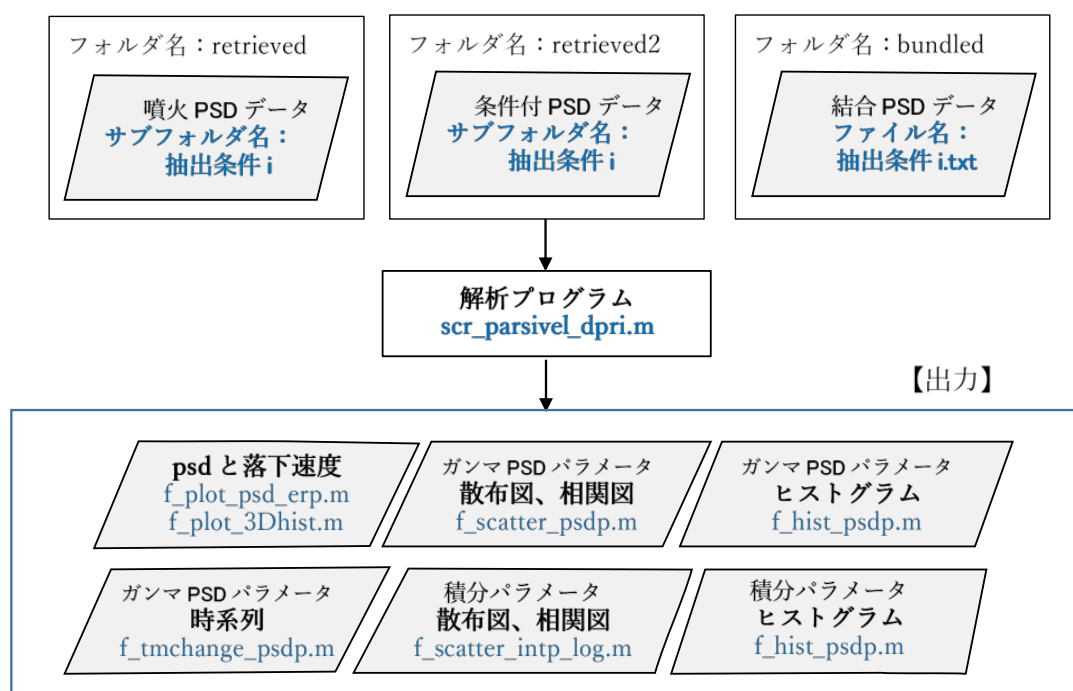


図 31 抽出された降灰データの解析手順と得られる結果を示す流れ図。

表 5 作成した PSD 解析プログラムの一覧

Matlabプログラム	機能
scr_parsivel_dpri.m	PSDデータの解析の中心となるmatlabスクリプトファイル
f_plot_psd_erp.m	観測されたPSDとガンマPSD近似（1分毎）
f_plot_3Dhist.m	粒子の落下速度の三次元ヒストグラムとべき乗回帰直線
f_tmchange_psdp.m	PSDパラメータの時系列図
f_scatter_intp.m	積分パラメータ間の散布図
f_scatter_psdp.m	ガンマPSDパラメータ間の散布図
f_hist_psdp.m	PSDパラメータのヒストグラム

iii) 解析結果

表 6 に scr_parsivel_retrieve_iku.m により抽出された「噴火 PSD データ」の噴火事例数（地点総数とサンプル総数）を示す。但し、降雨データは除外している。抽出は各年、各噴煙高度でおこなった。2018 年から 2020 年の 3 年間の全観測地点で抽出された「噴火 PSD データ」は 801 噴火事例（2089 点、67635 サンプル）であった。「噴火 PSD データ」のうち、降灰時間が 10 分以上観測された事例を選び出した結果を表 7 に示す。3 年間の全観測地点で抽出された「噴火 PSD データ」は 405 噴火事例（988 点、63357 サンプル）であった。噴煙高度が 3000m 以上の場合は、27 噴火事例（65 地点、2432 サンプル）である。以降に示す解析結果は表 7 のサンプルデータを使用している。

表6 scr_parsivel_retrieve_iku.mにより抽出された「噴火 PSD データ」。数値は、噴火事例数（地点総数、サンプル総数）。

	Eruption column height			Total
	1000–2000 m	2000–3000 m	≥ 3000 m	
2018	193 (475, 17477)	38 (79, 1729)	9 (17, 291)	240 (572, 19497)
2019	177 (463, 21816)	75 (160, 2313)	17 (40, 325)	269 (664, 24454)
2020	217 (636, 17426)	62 (161, 4276)	13 (55, 1982)	292 (853, 23684)
Total	587 (1574, 56719)	175 (400, 10631)	39 (112, 2598)	801 (2089, 67635)

表7 scr_parsivel_filecp.mにより選択された「条件付き PSD データ」（条件：観測時間 10 分以上）。数値は噴火事例数（地点総数、サンプル総数）。

	Eruption column height			Total
	1000–2000 m	2000–3000 m	≥ 3000 m	
2018	95 (223, 16491)	20 (41, 1544)	5 (8, 262)	120 (272, 18297)
2019	82 (203, 20832)	41 (72, 1933)	11 (15, 250)	134 (290, 23015)
2020	98 (292, 16091)	42 (92, 4034)	11 (42, 1920)	151 (426, 22045)
Total	275 (718, 53414)	103 (205, 7511)	27 (65, 2432)	405 (988, 63357)

図 32 は地点毎の降灰観測総時間と観測された噴火総事例数である。火口の南から南東方向で観測数が多くなっていることがわかる。また、火口の西側ではあるが、火口に近い HIK では多くなっている。これに対して、火口の北西側では少なくなっている。

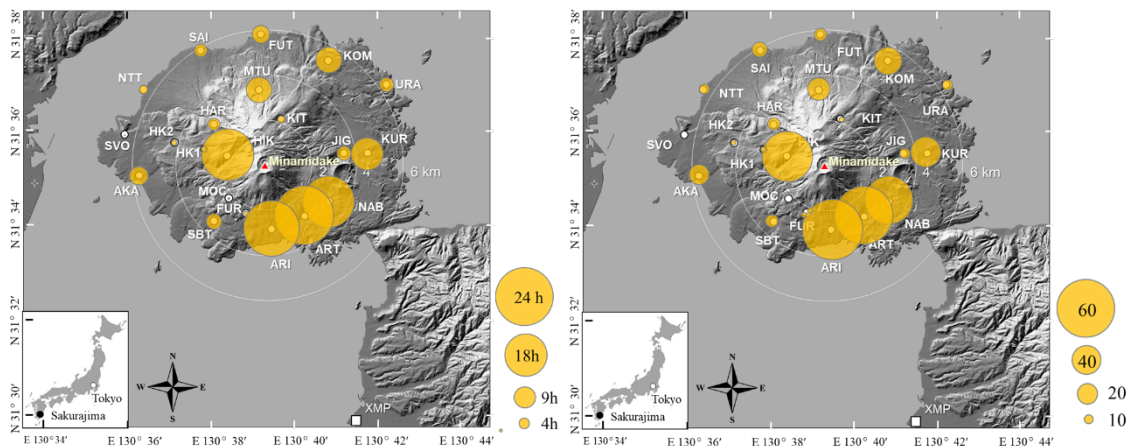


図 32 「条件付 PSD データ」の地点毎の総降灰観測時間（左図）と総噴火事例数（右図）。

多くの噴火事例で観測された PSD データを用いた RA-ZA 関係式および CA-ZA 関係式を求めた。ここで、CA は火山灰の空間密度である。図 33 は噴煙高度 1000m 以上

の全噴火事例について求めた RA-ZA 関係式および CA-ZA 関係式である。得られた関係式は

$$RA = 7.16 \times 10^{-2} ZA^{0.735}; \quad RA \text{ (kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}\text{)}, \quad ZA \text{ (mm}^6 \text{ m}^{-3}\text{)}$$

$$CA = 1.71 \times 10^{-5} ZA^{0.646}; \quad CA \text{ (kg m}^{-3}\text{)}, \quad ZA \text{ (mm}^6 \text{ m}^{-3}\text{)}$$

である。なお、降灰粒子の密度は $2.5 \times 10^3 \text{ (kg m}^{-3}\text{)}$ を用いている。RA-ZA 関係と CA-ZA 関係を比較すると、前者に比べて後者のばらつきの方が大きい。ばらつきの程度は、同じ ZA に対して、RA、CA ともに 1 桁程度の変動がある。

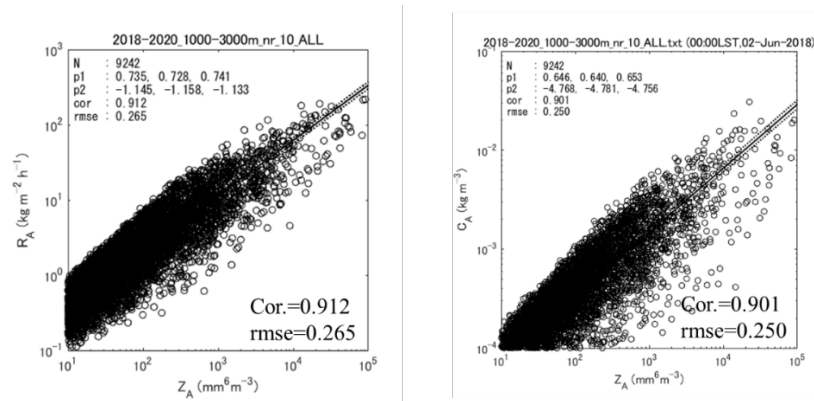


図 33 噴煙高度が 1000m 以上の全噴火事例の「条件付 PSD データ」から求めた RA-ZA 関係式（左図）と CA-ZA 関係式（右図）。

図 34 は、噴煙高度が 1000m–2000m、2000m–3000m、3000m 以上の噴火事例のそれぞれの場合の RA-ZA 関係式と CA-ZA 関係式である。結果を見ると、両関係式は、1000m–2000m と 2000m–3000m では大きく変わらないが、3000m 以上の噴火事例の場合には、両関係式の y 切片の値が他の高度に比べて小さくなる傾向が認められる。この理由として噴火の規模が大きくなる（噴煙高度が高くなる）と、大きな粒子が放出されるためと考えられる：大きな粒子は ZA の値は直径の 6 乗に比例するのに対して、RA は直径の $3 + \alpha$ 乗（ α は落下速度に関するパラメータで 1 以下）に比例し、CA は直径の 3 乗に比例するためである。

得られた RA-ZA 関係式を用いると、レーダ観測から降灰量分布を求めることが可能になる。その例を図 35 に示す。解析した噴火事例は 2019 年 11 月 8 日 17:24 の桜島噴火の例で、噴煙高度は 5700m（気象庁発表）であった。用いたデータは 2 仰角の PPI データで、降灰の観測頻度は 1 分毎である。レーダから推定された総降灰量は約 5.1 万トン、総降灰面積は約 70 km² である。レーダ情報の利点は、降灰の量の情報に加えて降灰の分布の情報が得られる点である。図 35(a)には、火口付近で降灰量が最も多く、風下である南東方向に降灰域が伸びている様子が示されている。興味深いのは、降灰量と降灰の観測時間が必ずしも対応していない点である。降灰量は風下に行くに従って少なくなるのに対して、降灰時間は風下に行くに従って長くなり火口から約 10km のところで最長となっている。桜島のすぐ南沖に弱いエコーが見られる。弱い降雨によるものかも知れない。総降灰量の時間変化を見ると、

最初に急激に増え、その後ゆるやかに増えて最大値まで達している。一方、総降灰面積はほぼ直線的に増えている。

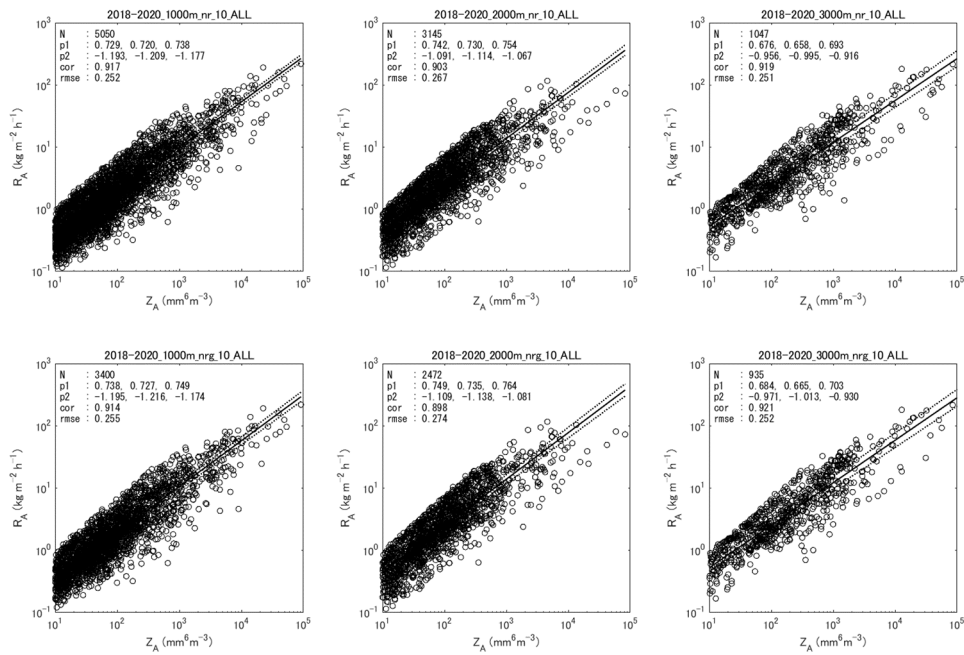


図 34 噴火高度別に求めた RA-ZA 関係式（上段の図）と CA-ZA 関係式（下段の図）。
左図：噴煙高度は 1000m-2000m、中央図：2000m-3000m、右図：3000m 以上。

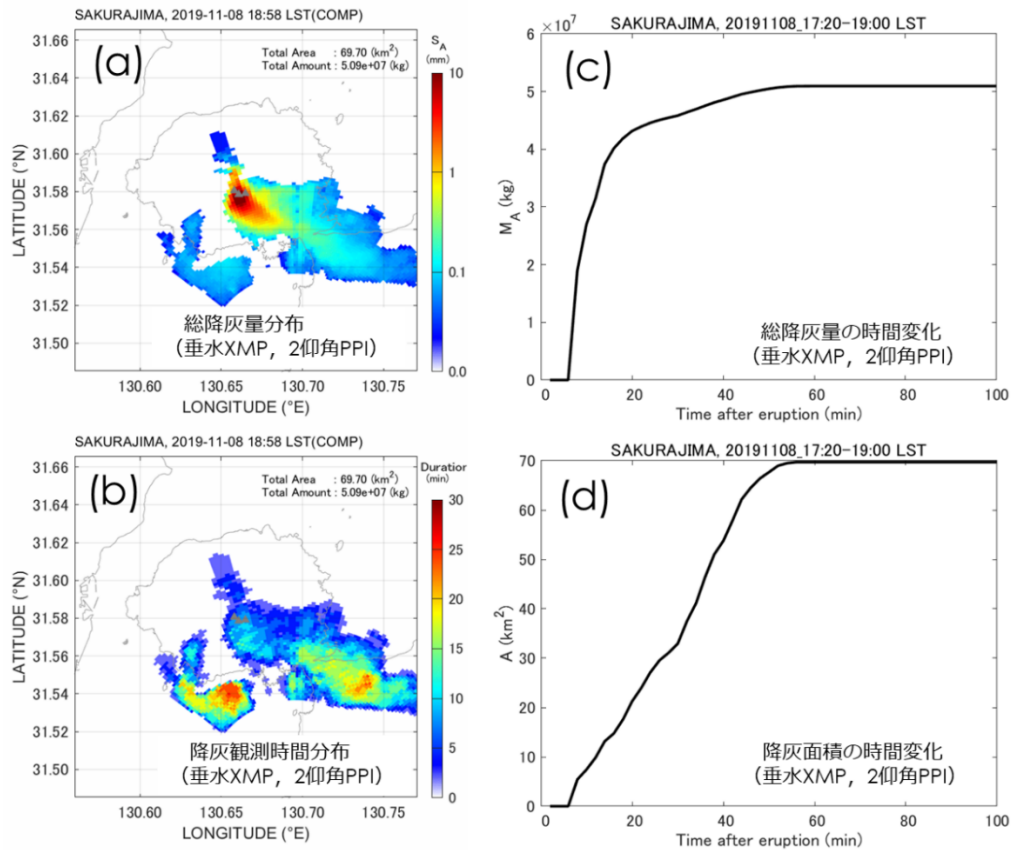


図 35 国土交通省垂水 X バンド MP レーダから求めた降灰情報。(a)積算降灰量分布 (b)降灰観測時間分布、(c)総降灰量の時間変化、(d)総降灰面積の時間変化。2019 年 11 月 8 日の噴火事例。

iv) まとめと展望

今年度は、桜島に設置されたディストロメータにより、2018 年から 2020 年の 3 年間に収集された PSD データを用いて、RA-ZA 関係式と CA-ZA 関係式を求めた。使用したサンプル数は、405 噴火事例 (988 点、63357 サンプル) である。得られた RA-ZA 関係式と CA-ZA 関係式の変動が大きく、同じ ZA の値に対して RA、CA の推定値が 1 桁違うことがあり得る。従って、今回得られた関係式を実際のレーダ観測に用いる場合には、推定誤差に注意しておく必要がある。ただし、長期間の積算された RA や CA を求める場合には RA-ZA 関係式と CA-ZA 関係式の変動の影響は少なくなると考えられる。

RA-ZA 関係式と CA-ZA 関係式の変動の理由として、粒径分布の変動、粒子の密度の変動(本解析では一定値とした)、密度の変動に関して落下速度が変動すること、などが考えられる。推定精度向上の最も単純な方法は、噴火事例毎に求めた RA-ZA 関係式と CA-ZA 関係式を使うことである。これは、レーダ雨量の推定精度を地上で観測された雨量で補正する(解析雨量)という考え方である。桜島の場合にはこの方法が可能であろう。国内外の他の火山にも適用できる関係式を求める為には、粒径分布や密度の変動をもたらす要因を調査する必要がある。

f) 船舶レーダによる噴煙観測

船舶レーダは船の安全な航行のために用いられるレーダである。その特徴の一つに、ファンビームを射出するスロットアンテナが採用されていることが挙げられる。これは、海上を揺れながら航行する船舶の周りの障害物や他の船舶を検知するためである。また、障害物を素早く検知するためにスロットアンテナを高速度で回転させる点も船舶レーダの特徴の一つである。真木・他（2020）は、アンテナの回転軸を 90° 傾け、火口方向に向けて縦回転させることにより噴煙柱の発達過程の観測に船舶レーダが利用できるのではと考えた（図 36）。京都大学防災研究所の一般共同研究（2018 年～2019 年）の中で実施した桜島での試験観測の結果は、船舶レーダは 1.25 秒間隔で噴煙柱の発達の様子を捉えることに成功し、更に、弱い雨の中での噴煙柱を検出できる可能性があることが確かめられた。これらの成功をもとに、複数台の船舶レーダによる噴煙柱のモニタリング技術の実用化を目指した研究が 2021 年度から開始された。船舶レーダは一般の気象レーダと比べて安価であること、耐久性に優れていること、輸送や設置が容易であることから、本研究では、複数台の船舶レーダによる噴煙柱の同時観測技術の実用化を目指している。以下、本報告では、船舶レーダの仕様、データ処理について述べ、2021 年度に実施した機動観測の結果および噴煙柱の観測結果の例を紹介する。

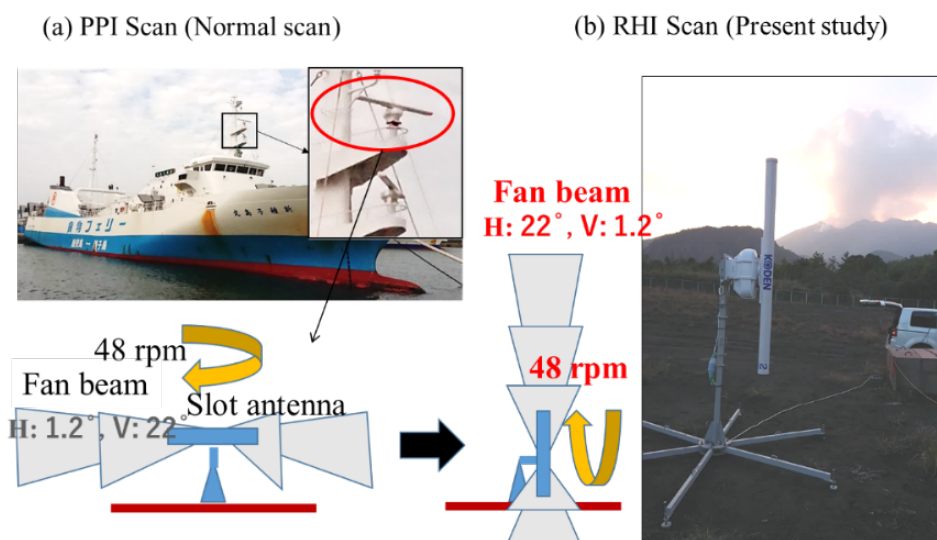


図 36 (a) 通常の船舶レーダのアンテナスキャンモード。(b) 噴煙柱の観測用のアンテナスキャンモード。

i) 船舶レーダの主な仕様

使用した船舶レーダは、FRS コーポレーションが所有するマグネトロンタイプの X バンド船舶レーダ、北海道大学が所有するマグネトロンタイプの X バンド船舶レーダ、鹿児島大学・(株)光電製作所の固体素子タイプの X バンド船舶レーダ 2 台である。FRS コーポレーションのレーダは、2021 年 5 月 7 日に京都大学防災研究所桜島ハルタ山観測点に設置され、同年 7 月末まで観測がおこなわれた（図 37a）。北海道大学のレーダは 2021 年 6 月 4 日に京都大学防災研究所桜島黒神観測点に設置さ

れ通年観測がおこなわれた (図 37b)。鹿児島大学・(株)光電製作所の固体素子タイプのレーダのうち 1 台 (400W) は、2021 年 5 月 14 日に京都大学桜島火山観測所の屋上に設置され、通年観測がおこなわれた (図 37c)。もう 1 台の固体素子レーダ (100W) は、車に搭載されて機動的な噴煙柱の観測に用いられた (後述)。



図 37 複数台の船舶レーダによる噴煙柱の定点観測。(a) 京都大学防災研究所桜島ハルタ山観測点に設置された FRS コーポレーションの船舶レーダ。(b) 京都大学防災研究所桜島黒神観測点に設置された北海道大学の船舶レーダ。(c) 京都大学防災研究所桜島火山観測所屋上に設置された鹿児島大学・光電製作所の船舶レーダ。

図 38 にマグネトロンタイプの船舶レーダの構成を示す。レーダは本体 (送受信機・アンテナ、レーダ制御パネル) と観測画像収録ユニットから構成される。画像収録ユニットは、研究用に追加されたユニットで、レーダ本体から送られてくる画像データを PC のハードディスクへ保存する。表 8 にマグネトロンタイプの船舶レーダの主な仕様を示す。レーダの波長は 3cm、アンテナは長さ 2m のスロットアンテナ、ビーム幅は水平 1.2° 、垂直 22° のアンテナの回転速度は 48rpm である。これらの仕様により、成長する噴煙柱の鉛直構造を方位角 22° 、仰角 1.2° のビーム幅で、48rpm (1.25 秒毎) の時間分解能で観測することが可能となっている。

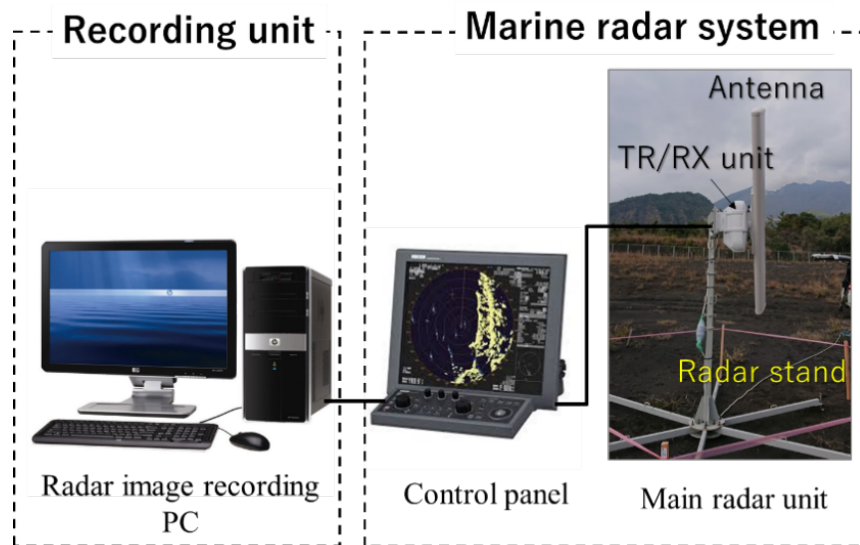


図 38 マグネトロンタイプの船舶レーダの構成。

表 8 マグネトロンタイプの X バンド船舶レーダ（北海道大学）の主な仕様

Antenna	Length	197 cm
	Beam width	H: 1.2°, V: 22°
	Scan speed	24, 48 rpm
	Polarization	H
Transmitter	Frequency	9410 ± 30 MHz
	Peak power	25kW, Magnetron
	Pulse width	0.08, 0.2, 0.3, 0.6, 1.2 μs
	PRF	2000 Hz
	Range resolution	12, 30, 45, 90, 180 m
Receiver	IF (bandwidth)	60 MHz (5, 15 MHz)
	Noise figure	≤ 6 dB
Monitor	Size	19 inch colour LCD
	Resolution	1280 × 1024 pixel
	Range accuracy	8 m

近年、周波数の有効利用と保守の利便性からマグネトロンレーダに代わって固体素子レーダが実用化されている。図 39 に固体素子レーダの基本システム構成を示す。表 9 に主な仕様を示す。マグネトロンレーダと大きく異なるのは送信形式である。マグネトロンレーダでは高出力の単一パルスを利用するのに対して固体素子レーダでは低出力の長パルスを利用し、パルス圧縮技術を用いることでマグネトロンと同等のレンジ分解能を得ている。但し、レーダの近傍の数 km レンジでは長パルスが使えないのでマグネトロンレーダと同様に短パルスでの観測である。固体化レーダシステムの構成や制御用アプリケーションソフトの詳細は、「火山噴火機動観測レーダの基本設計」（2019年3月、非公開）に記載されている。また、遠隔操作などの将来の運用に関しても記載されている。

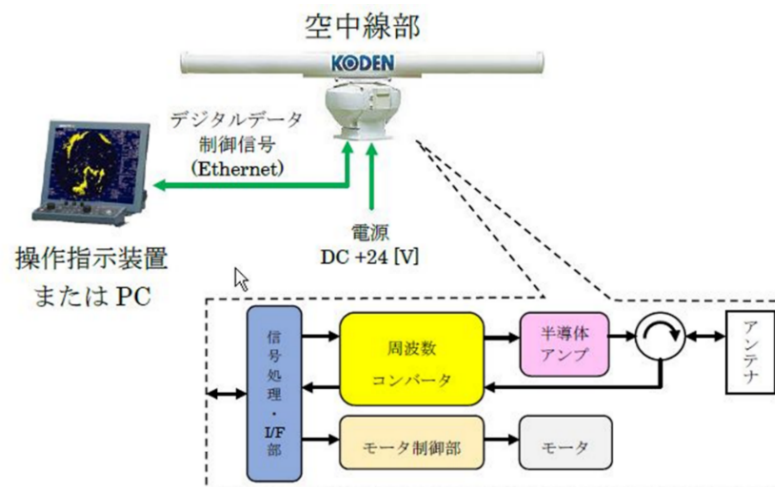


図 39 固体素子船舶レーダの基本構成

表 9 固体素子タイプの X バンド船舶レーダの主な仕様

項目	仕様	備考
アンテナ型式	オープンアンテナ	アンテナサイズ 6ft, 9ft(公称値)
送信出力 (尖頭値)	100 W \pm 50 % / 400 W \pm 50 %	
送信周波数	9380~9420 MHz	P0N : 9390 \pm 10 [MHz] Q0N : 9410 \pm 10 [MHz]
周波数安定度	\pm 2.0 ppm	
アンテナ回転数	24 or 48 rpm	0.250 or 0.125 deg/s
送信パルス幅	P0N : 0.08~1.2 μ sec Q0N : 5~18 μ sec	P0N : 24~360 m Q0N : 1500~5400 m
掃引周波数幅	Q0N : 5, 10, 15 MHz	
繰り返し周波数	450~2600 Hz	
探知距離レンジ (設定可能範囲)	0.125~64 NM (100 W) 0.125~96 NM (400 W)	0.2~118.5 km (100W) 0.2~177.8 km (400W)
最小探知距離	40 m 以内	
距離分解能	40 m 以内	
距離精度	8 m またはレンジの 1 % 以内	
ドップラー周波数精度	TBD	
電源電圧	定格 直流 +24 [V]	
消費電力	100 W 以下 (100 W) 150 W 以下 (400 W)	空中線部のみ
質量	29 kg 以下 (100 W) 33 kg 以下 (400 W)	空中線部のみ
使用温度範囲	-25~+55 $^{\circ}$ C	空中線部のみ
防水	IPX6	空中線部のみ

ii) データ処理

マグネトロンタイプの船舶レーダの噴煙柱観測データは bmp 形式の画像ファイルである。受信電力に対応する輝度値が 0-255 のデジット値で記録されている。画像データのノイズ処理、時系列画像の解析から、噴火時刻、噴煙柱のエコートップ、噴火継続時間等の情報が求められる。これらのデータ処理の詳細は真木・他 (2020) に記載されている。

一方、固体素子船舶レーダの観測データは受信電力値で、ksd という拡張子のファイル (以下、KSD ファイルという) に格納されている。1 つの KSD ファイルには方位角複数周回分の情報が含まれており、長さは可変である。また、ファイル先頭の方位角は 0° とは限らず、方位角 1 周分 ($0\sim 360^{\circ}$) のデータが複数のファイルに

跨って格納されている場合がある。そこで、KSD ファイルに含まれる観測データを方位角 1 週 (0~360°) 毎に分割して NetCDF ファイルに保存する Matlab ベースのプログラム (ksd2nc.m) を作成した。ksd2nc.m には、方位角 1 周分のデータが複数の KSD ファイルに跨っている場合には、これらを結合する機能を備えている。使用している固体素子船舶レーダはプロトタイプのレーダでいくつかの制約がある。その一つに、通信環境によってレーダからのデータ受信時に欠測が生じる可能性がある点である。ksd2nc.m は、このような場合でも正常に動作するように作られている。なお、ksd2nc.m は KSD ファイル内のデータが方位角の回転に沿って整列していることを前提としている。NetCDF に変換されたレーダデータは、ANT3D に組み込まれた関数 plot_ppixy.m で描画することができる。また、NetCDF に変換された PPI データから 80×80 km 以内の降灰量分布情報を準リアルタイムで求めることも可能であるが、このためには固体素子レーダ用の降灰量推定式 (RA-ZA 関係式) を確立する必要があり、今後の課題である。

iii) 機動観測

船舶レーダの利点の一つに輸送・設置が容易であることが挙げられる。そこで、船舶レーダによる噴煙観測の機動性を確認するために、車による陸域での機動的な観測を試みた。試験観測は 2021 年 9 月 30 日におこなわれた。バンタイプのレンタカーを用意し、その中にレーダ本体、アンテナ固定用支柱、計測用 PC、バッテリーなどを積み込み、桜島の南岳火口方向を見渡せる場所へ移動して観測をおこなった。事前に調査した複数箇所の観測場所候補地から、桜島島内の古里公園駐車場、野尻川左岸の旧土石流観測所駐車場、鹿屋市の輝北うわば公園駐車場を選定し、機動観測の「予行演習」をおこなった (図 40)。レーダの組み立てから観測開始までの時間は 50~60 分であった。このうち、ほとんどの時間 (40~50 分) はアンテナ支柱の組立てとレーダ本体の固定作業に費やされた。この作業を効率化できれば、観測場所に移動後、約 30 分以内で観測を開始できるであろう。バッテリーは市販の車用 24V バッテリー 4 台を用い、半日程度の連続観測が可能であることを確認している。リチウム電池や携帯用発電機などの利用も考えられる。太陽光発電については経費および設置の観点から現時点では機動観測には不適であろう。

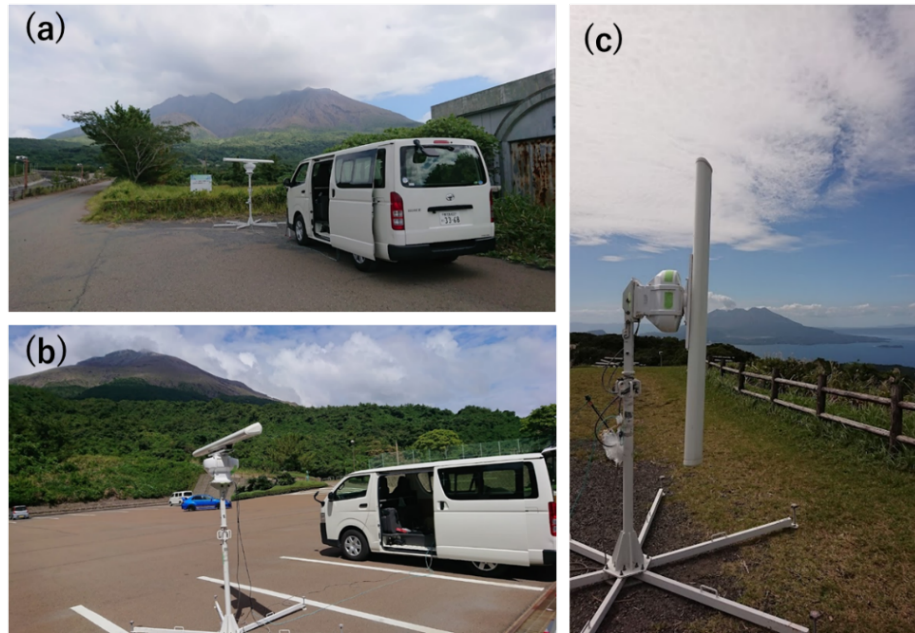


図 40 固体素子船舶レーダによる陸域での機動的降灰観測の「予行演習」(2021 年 9 月 30 日)。(a)旧野尻川土石流観測所駐車場 (桜島)、(b)古里公園駐車場 (桜島)、(c)輝北うわば公園駐車場 (鹿屋市)。

iv) 観測結果

2021 年度は例年に比べて桜島の噴火回数が少なかった。ここでは、2021 年 1 月 28 日 13:19 に発生した噴火の観測例を紹介する。気象庁によれば、この噴火は南岳 B 火口で発生し、噴煙高度は 3400m であった。噴石が 4 合目まで飛散するのが確認され、噴煙は南東方向に流れた。桜島火山観測センター (SV0) に設置された鹿児島大学・光電製作所の固体素子レーダはこの噴火の様子を捉えた。図 41 に観測された噴煙柱の発達の様子を 10 秒間隔の時系列で示す。実際の時系列は約 2.5 秒間隔である。図によれば、噴火後の噴煙柱の立ち上がる様子とその後の連続して放出される弱い噴煙が示されている。噴煙高度が気象庁の発表より低いのは、レーダビームの方向が東だったのに対して、噴煙の移流方向が南東であったために噴煙柱の本体がレーダビーム外に移動したためである。

この噴火事例では、噴火直後に噴石が飛散したことが気象庁により報告されている。この噴石を船舶レーダは捉えていた。図 41 は噴火直後のエコーの時系列を 2.5 秒間隔で表示した図である。白い楕円で囲ったところに複数の噴石のエコーが確認出来る。いくつかの仮定をおけば、エコーの軌跡の解析から噴石の大きさを推定することが可能であろう。本事例は、山形大学の高速度カメラ撮影でも捉えられており、両者の比較解析が可能である。

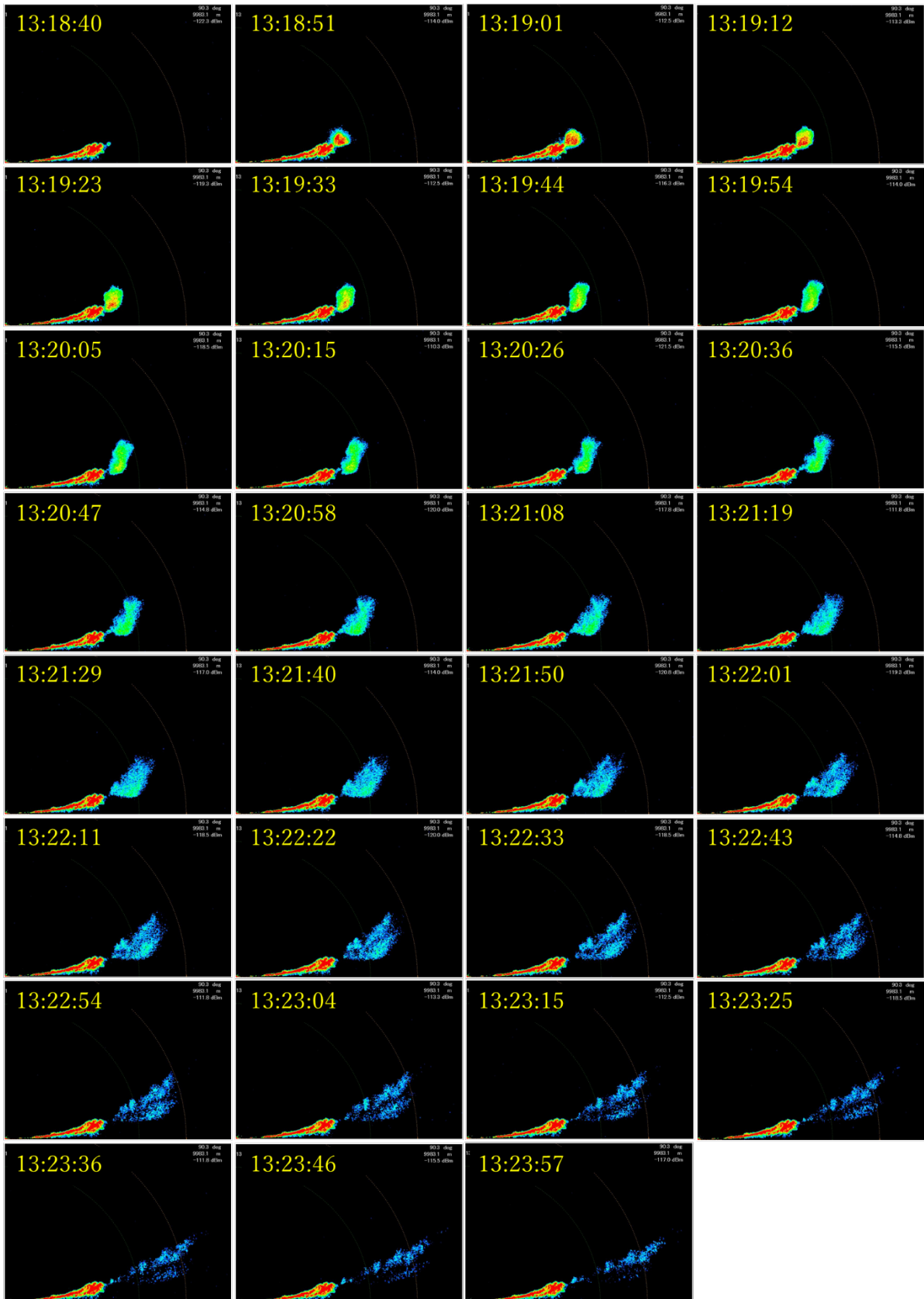


図 41 京都大学桜島火山観測所に設置された鹿児島大学・光電製作所の固体体素子船舶レーダが捉えた 2022 年 1 月 28 日の噴火。

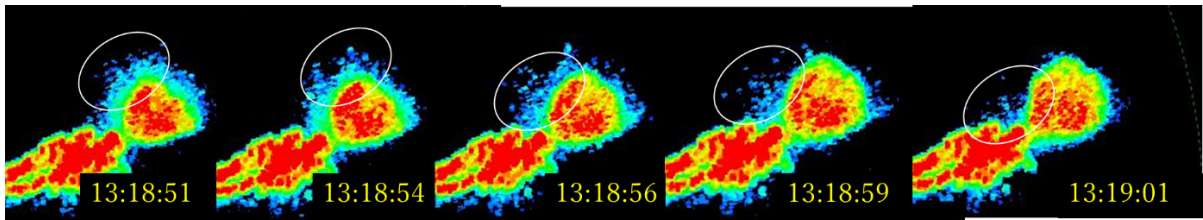


図 42 固体素子船舶レーダが捉えた噴石エコー。2022 年 1 月 28 日の噴火。

v) まとめと展望

本報告では、複数台の船舶レーダによる噴煙柱の定点観測と機動観測について述べた。噴火の回数が例年に比べて少なかったために、捉えられた噴火事例はわずかであった。2022 年 1 月 28 日の噴火（噴煙高度 3400m）を固体素子レーダで捉えることに成功した。2018 年および 2019 年の観測では、マグネトロンタイプの船舶レーダが噴煙柱を捉えられることを確認していたが、今回、固体素子レーダでも、噴煙柱の発達過程や噴石の検出が可能であることが確かめられた。固体素子レーダはマグネトロンタイプのレーダと比較して、収録データが受信電力であること、送信機の寿命が長い、ノート PC でデータ収録ができるなどの利点があり、機動的な観測に向いている。今後の課題として、固体素子レーダによる定量的な降灰量の推定手法の開発がある。このためには、小型 X バンド MP レーダとの同時観測や地上のディストロメータとのアジャストなどが考えられる。実用化に向けてのもう一つの課題は収録データ量が膨大になる点である。現在のシステムでは、7TB/1 ヶ月のハードディスクが必要である。来年度は、噴火の自動検出や検出後のデータの自動収録方法について検討し、リアルタイムでの噴火情報の配信につなげたい。

3) 火山灰拡散予測の高速化技術開発

桜島島内にある観測点の改修作業や過去データの再検討により、地盤変動及び火山性微動振幅データから火山灰放出率を求める推定式を高精度化した。また、火山灰噴出率推定式を桜島以外の火山に拡張するために、桜島における広帯域地震記録の超長周期成分の解析を行うとともに、長期間の噴火活動を継続している諏訪之瀬島やインドネシアのシナブン火山の火山性微動を解析し、推定式の拡張性について検討した。また、噴煙柱形成・火山灰拡散を同時に再現する高精度シミュレーションにより、ブルカノ式噴火の噴火強度に対する噴煙高度と火山灰堆積分布の応答に関するデータベースを充実させた。

a) 地盤変動量と火山性地震・微動のエネルギーを用いた火山灰放出量推定の高精度化

桜島火山における 2021 年以降のデータを加えて、火山灰放出量推定式を再検討した。また、火山灰重量放出率に着目し、噴煙高度との関係を検討した。

i) 2022 年 3 月までの桜島の噴火活動

火山灰放出量は地盤変動量と火山性地震・微動のエネルギーと相関があることが知られており、火山灰放出重量 (W_e) は、2-3Hz の周波数帯のスペクトル (A) と地盤変動を励起する圧力源の体積変化 (ΔV) に対して以下の線形関係がある (Iguchi, 2016)。

$$W_e = \alpha A + \beta \Delta V + \gamma \quad (1)$$

2009 年から 2013 年までの昭和火口の噴火活動では、 $\alpha = 3.8 \times 10^{-5}$ 、 $\beta = 2.6$ 、 $\gamma = -1.03 \times 10^5$ と近似されている (Iguchi, 2016)^{4, 10)}。ここで、 γ は常時微動を考慮した補正項である。昭和火口の噴火活動は 2015 年 6 月までは、頻繁に発生したが、7 月以降は噴火活動が低下し、2016 年 7 月 27 日から 2017 年 3 月 24 日までは噴火が発生していない。2017 年 4 月以降、噴火は頻繁に発生したが、10 月 30 日の噴火からは南岳において噴火が頻発するようになった。

2017 年 11 月以降の桜島南岳の噴火活動を鹿児島地方気象台の観測による火口上噴煙高度、空振振幅、爆発地震の最大振幅、地盤変動により図 43 に示す。2022 年までの噴火活動は、7 つの Episode に分けられる。最も活動的であったのは、2019 年 9 月に始まり、2020 年 6 月まで続いた Episode5 である。その後、2020 年後半から 2021 年 5 月までの Episode6、2021 年第 4 四半期から 2022 年 2 月までの Episode7 が現れているが、Episode5 に比べて噴火発生頻度も少なく、爆発強度も小さい。

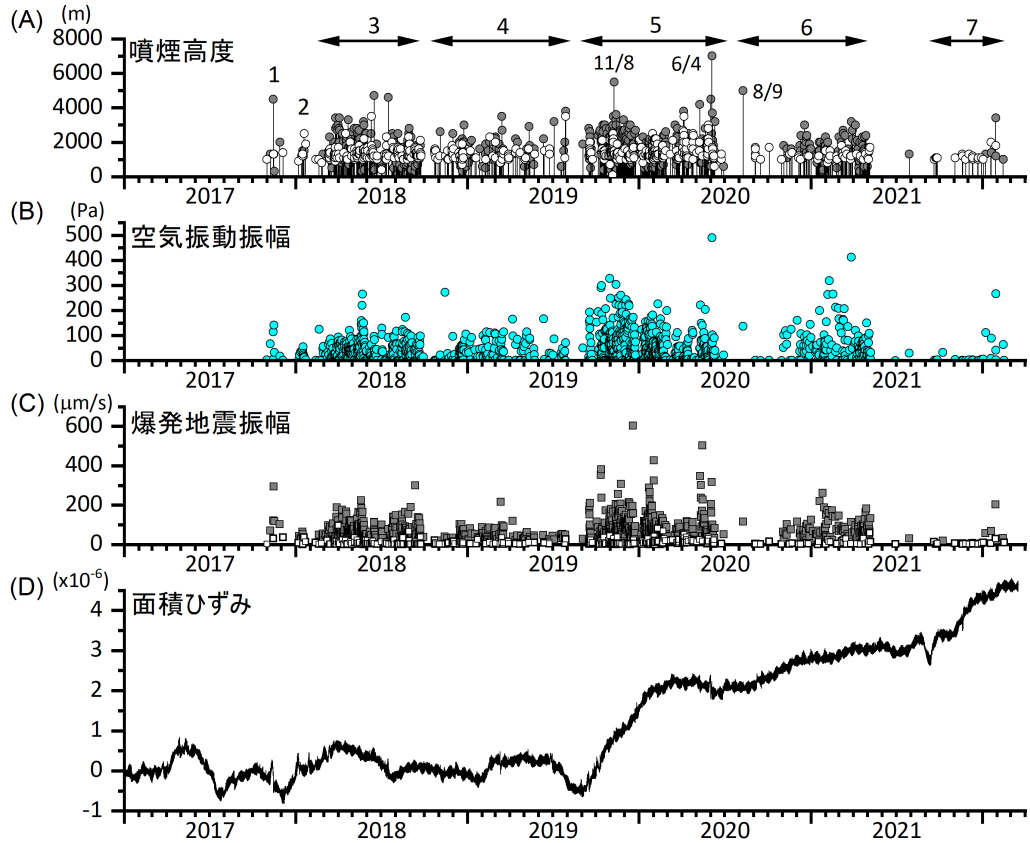


図 43 2017 年 11 月以降の南岳の噴火活動の推移．(A) 鹿児島地方気象台の発表する火口縁上噴煙高度，(B) 有村観測坑道における空気振動振幅．(C) 有村観測坑道における爆発地震の最大振幅．(D) ハルタ山観測坑道における面積ひずみ（火口方向ひずみ+直交方向ひずみ）の変化．

ii) 火山灰放出量の推定式の検討

2022 年 3 月までのデータを含めて、火山灰放出量と地盤変動量－火山性地震・微動のエネルギーの関係を再検討した。

図 44 に 2009 年 1 月から 2022 年 3 月までの 13 年間の月ごとの火山灰放出量と地盤変動量－火山性地震・微動のエネルギーから推定した火山灰放出量の関係を示す。月ごとの火山灰放出量は、鹿児島県内 62 点における降灰量の実測値から推定されたものである (Iguchi, 2016)。係数については、昭和火口噴火活動期については $\alpha = 3.8 \times 10^{-5}$ 、 $\beta = 2.6$ 、 $\gamma = -0.5 \times 10^5$ とした。南岳噴火活動期については、 $\beta = 2.2$ とした方が火山灰放出量をうまく説明できる。噴火活動期によって、係数を変える必要が指摘できる。2021 年以降の噴火については、噴火の規模が小さく、降灰量も少ないので、これまでの推定式を同様に適用可能である。

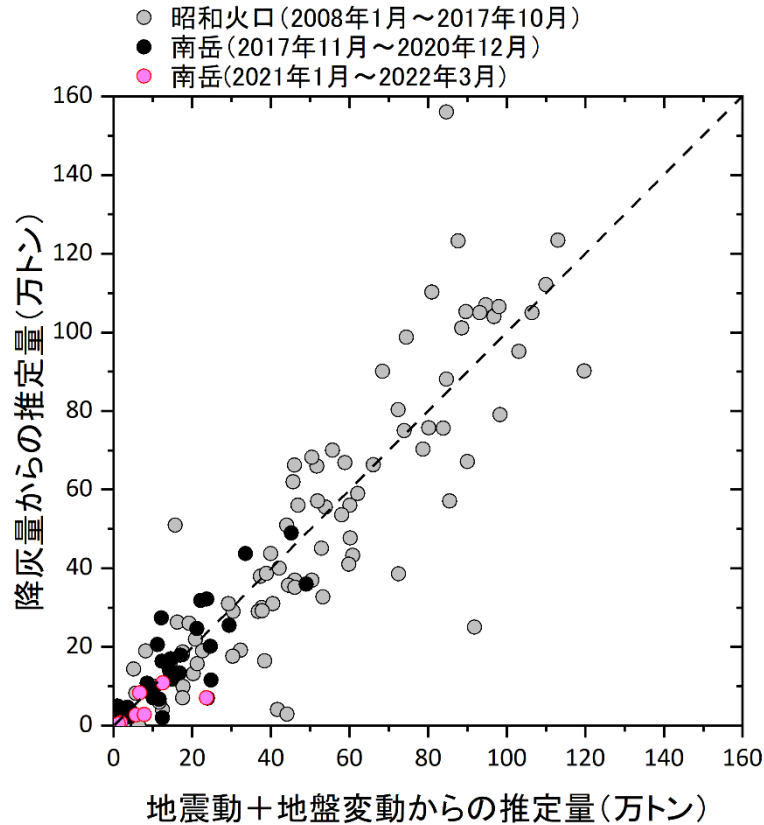


図 44 2009 年 1 月から 2022 年 3 月までの 13 年間の月ごとの火山灰放出量と地盤変動量－火山性地震・微動のエネルギーから推定した火山灰放出量の関係。

b) 火山灰放出率と噴煙高度の関係の検討

これまででは噴火に伴う地盤変動を励起する圧力源の体積変化率と噴煙高度の関係を検討してきたが、式 (1) から火山灰放出率を求めることができるので、火山灰放出率と噴煙高度の関係を検討する。

i) 桜島における噴煙高度の推移

2009 年 2 月～2022 年 3 月に桜島の昭和火口か南岳火口において発生した噴火の噴煙高度の推移を図 45 に示す。ほとんどの噴煙高度は鹿児島地方気象台の遠望観測に基づくものであるが、雲入りの報告については、再検討したものもある。2012 年 7 月 24 日の爆発については、井口 (2013) に基づき 8000m とした。また、2020 年 6 月 4 日の爆発は X バンド MP レーダーの画像により火口縁上 4800m と決定した (令和 2 年度報告書)。

昭和火口噴火活動期には噴煙高度が徐々に高くなった。その後に発生した南岳噴火の噴煙高度は、昭和火口噴火より高い傾向がみられる。南岳噴火では Episode5 に当たる期間が最も噴煙高度が高いが、その後、低下している。

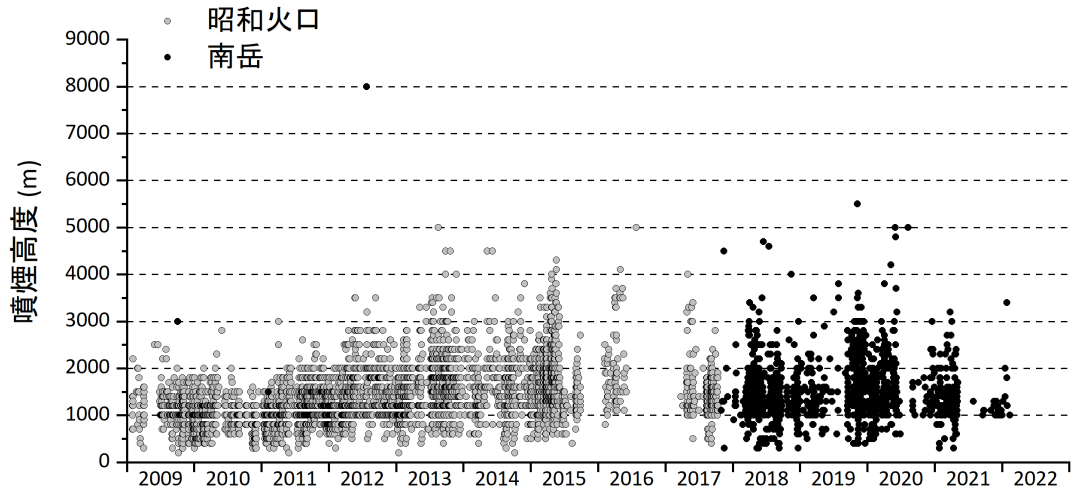


図 45 桜島の爆発に伴う噴煙高度の推移。主に、鹿児島地方気象台の観測によるが、必要に応じて、噴煙高度データを補てんした。黒丸は南岳、灰丸は昭和火口の噴火である。

ii) 火山灰重量放出率と噴煙高度の関係

図 45 に示した噴火のうち、有村観測坑道において 5 ナノストレイン以上のひずみ変化が検知され、かつひずみ変化の継続時間が 5 分以上続いた爆発は 4062 回発生している。式 (1) から火山灰重量放出率を求め、ひずみ変化の継続時間で割ったものを平均噴出率とした。噴煙高度と平均噴出率の関係を図 46 に示す。

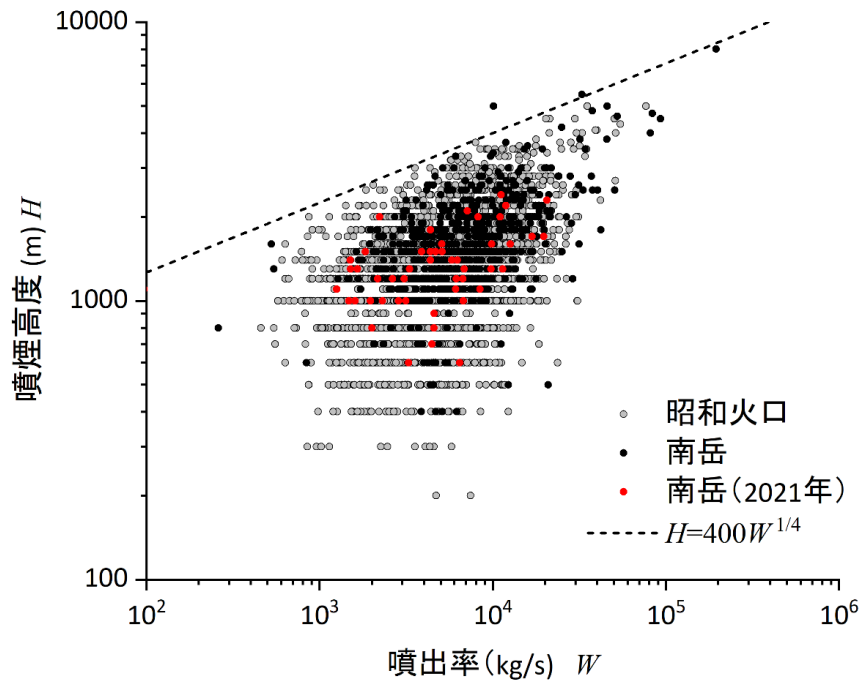


図 46 火山灰重量放出率と噴煙高度の関係。最近の 2021 年 1 月から 2022 年 3 月までの噴火については赤丸で示した。

2009 年から 2022 年 3 月までの期間では、2012 年 7 月 24 日に南岳において発生した爆発の噴出率が最大であり、195,000kg/s に達している。この噴火について気

象庁は噴煙高度を公表していないが、YouTube にアップロードされた桜島遠方からの画像により噴煙高度は 8000m とされている（井口、2013）。次いで、2017 年 11 月 13 日に南岳に発生した爆発の噴出率が大きく、93,100kg/s に達した。この爆発の噴煙高度は、レーダー観測から 4500m と推定されている。2020 年 6 月 4 日の爆発の噴煙高度は 4800m と推測されるが、噴出率は 37,600kg/s と見積もられる。このように噴煙高度が 4000m 以上に達した爆発では噴出率が大きく、噴出率と噴煙高度との間に相関が認められる。噴煙高度 (H) には噴出率 (W) に依存する上限が認められ、上限の直線は以下のように決定される。

$$H = 400W^{1/4} \quad (2)$$

2020 年 8 月 9 日に発生した爆発の噴出率は 10,100kg/s であったが、噴煙高度は 5000m に達しており、上限式を超えている。この爆発は、梅雨明け後に初めて発生した爆発であり、白色と灰褐色の噴煙が合わさっており、水蒸気爆発の特性を持つ。このことから、通常のマグマ性噴火よりも高い高度まで噴煙が達した可能性が考えられる。

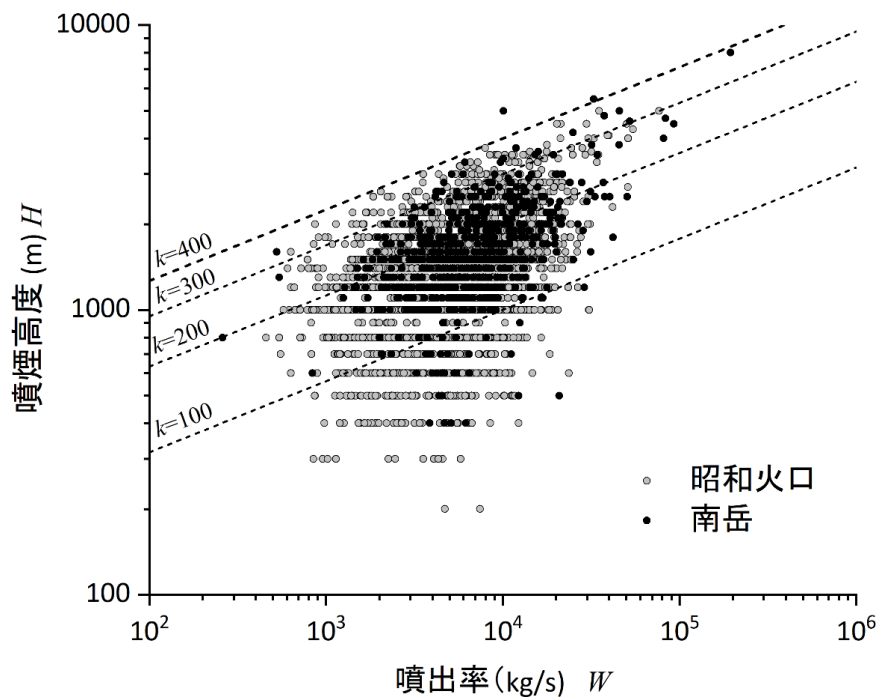


図 47 火山灰重量放出率と噴煙高度の関係。係数 $k=100$ 、 200 、 300 、 400 とした。

次に、式 (2) を以下のように一般化し、係数 k を検討する。

$$H = kW^{1/4} \quad (3)$$

図 46 に係数 $k=100$ 、 200 、 300 、 400 としたものを書き加えて、図 47 に示す。ほとんどの爆発について係数 k は $100 \sim 400$ の範囲にあり、平均的には $k=200$ と評価される。

c) 地震及び地盤変動観測の改修による噴出率の高精度化

令和3年度は、桜島北西部のハルタ山観測井の傾斜計および地震計の改修を行うことにより、火山灰噴出率の精度向上を図った。

i) ハルタ山観測井の傾斜計および地震計の改修作業

平成29年度の新島観測井（桜島南部）、平成30年度の新島観測井（桜島東部）、令和元年度の新島観測井（桜島北東部）、令和2年度の新島観測井（桜島南西部）の埋設型地震計（固有周期1秒）と傾斜計の改修を行ってきた。令和3年度は引き続き、桜島西部のハルタ山観測井（図48(a)）において埋設機器の回収作業を行った。

機器引き上げおよび改修作業は令和3年9月15日から開始し、9月27日に完了した。9月15日～9月18日にかけて旧機器の引き上げ、9月19日～9月25日にかけて孔内洗浄およびダミー通し試験を行い、ダミーの孔底部着底を確認した。9月26日、9月27日に改修機器の挿入作業を行い（図48(b)）、キー溝深度289mにて着底を確認した。改修機器の設置完了時に地震計・傾斜計機器の性能が正常であることを確認した。

(a) 実施場所



(b) 設置機器



図48 (a)ハルタ山観測井の位置図、(b)改修機器設置時の写真。

改修後の埋設型地震計の記録例を示す。図49(a)は2022年1月28日に発生した桜島南岳山頂火口の爆発的噴火に伴う爆発地震の波形である。平成29年度改修の新島観測井（桜島南部）、平成30年度改修の新島観測井（桜島東部）と合わせて示す。いずれの観測井においても、爆発地震の初動から数秒間には火道最上部における膨張・収縮過程を反映する地動が記録されている。図49(b)に同地震の上下動成分のスペクトルを示す。ここでも、先行して改修した新島および新島観測井の地震記録と比較した。爆発地震は低周波成分に富むが、3観測井ともに爆発地震の特徴である0.5～2Hz付近の低周波にピークを持ち、固有周期1秒の地震計が正常に動作していることが分かる。今年度改修を行ったハルタ山観測井と新島観測井は南岳山頂火口からのほぼ同距離であるが、機器の埋設設置深はハルタ山が289m、新島が90mと違いがある。いずれの地震動記録においても、約10～15秒付近に最大振幅を持つが、新島観測井ではより振幅が大きくなっている。また、スペクトルを比較すると、1Hz付近は同程度の振幅であるが、新島観測井の3Hzより高周波成分はハル

タ山観測井より振幅が大きくなっている。これは、古里観測井がハルタ山観測井より設置深度が浅いため、地表面や浅部の site 特性の影響を受けている可能性が考えられる。

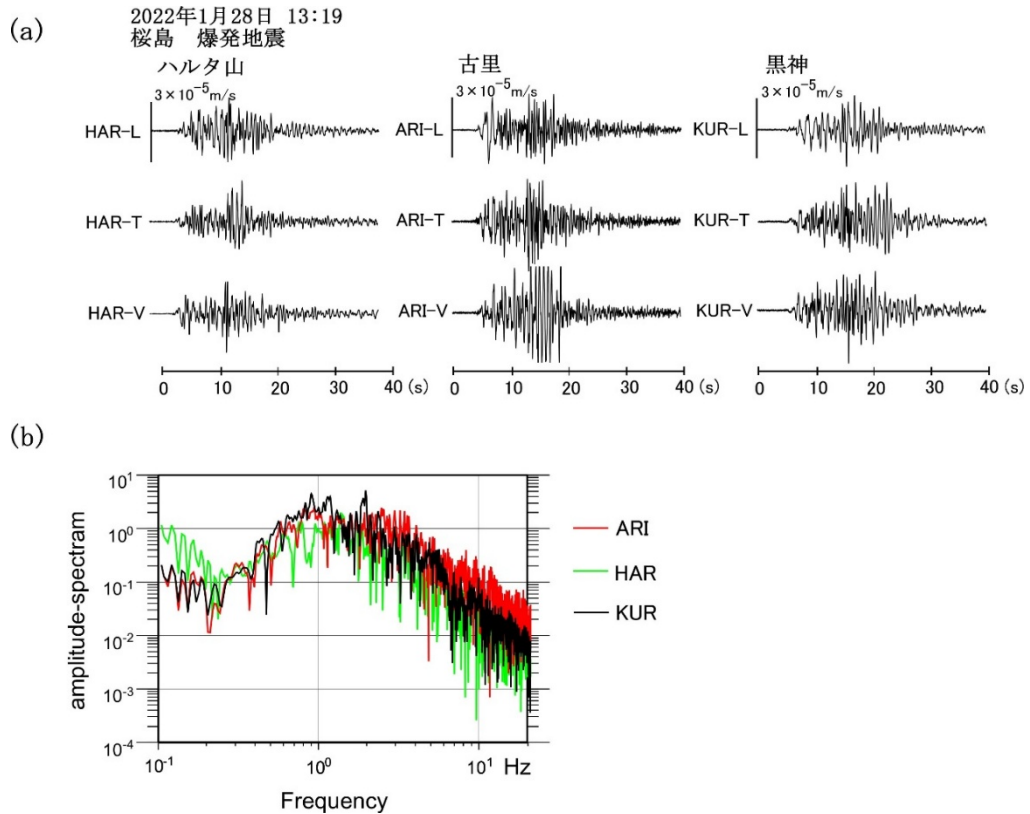


図 49 (a)2022 年 1 月 28 日に発生した桜島南岳の爆発的噴火に伴う爆発地震の波形。左列が今回設置したハルタ山観測井 (HAR) の地震計記録、中列が平成 29 年度に設置した古里観測井 (ARI)、右列が平成 30 年度に設置した黒神観測井 (KUR) の記録である。上から順に、水平動火口方向成分、水平動直交成分、上下動成分である。(b)ハルタ山 (HAR)、古里 (ARI)、黒神 (KUR) における爆発地震のスペクトル。

図 50 に 2022 年 1 月 12 日に南岳山頂火口直下 1.0km 付近で発生した火山構造的 (A 型) 地震のハルタ山観測井における波形記録を示す。この地震のマグニチュードは 0.3 と微小地震であるが、3 観測井において P 波および S 波は明瞭に記録されており、非常によい S/N 比で記録されている。火山性地震の高周波振動についても高精度で観測が可能であることが言える。

ii) ハルタ山観測井を用いた火山灰放出率の見積もり

火山灰放出重量は、2-3Hz の周波数帯の地震動スペクトルと地盤変動を励起する圧力源の体積変化から求めることができる (Iguchi, 2016)。用いられたのは有村観測坑道における地震動であった。

2022年1月12日 10:20
桜島 A型発地震

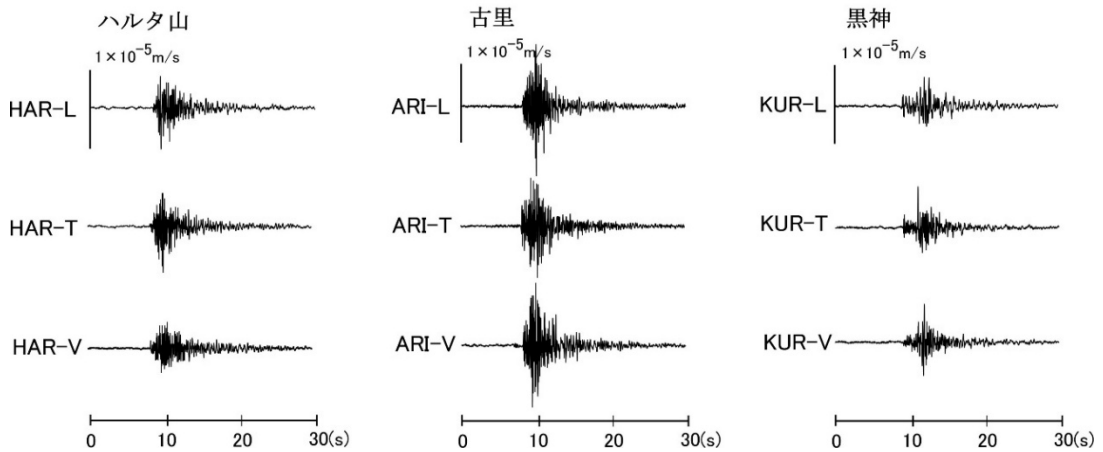


図 50 2022 年 1 月 12 日に南岳山頂火口直下で発生した火山構造的な地震の波形。

有村観測坑道における地震動の場合、係数 $\alpha = 3.8 \times 10^{-5}$ 、として火山灰放出率が求められている。ここでは、本年度において改修を行なったハルタ山観測井における係数 α を見積もってみる。

ここでは、有村観測坑道と同様に桜島南部にある古里観測井（南岳火口から 2.6km）をレファレンス点としてハルタ山観測井における 2-3Hz の周波数帯のスペクトルを比較した。2022 年 1 月に発生した数分の継続時間を持つ 4 例の小規模な噴火に伴う微動について比較し、図 51 に示した。4 例の噴火微動について 1 分間平均の 2-3Hz 帯のスペクトル、13 例を示した。ハルタ山と古里のスペクトル振幅比について相関はよく、振幅比の平均は 0.57 となる。したがって、ハルタ山観測井の地震動を用いれば、 $\alpha = 6.7 \times 10^{-5}$ とすればよい。係数 α の相違は、震源距離、地震波の伝搬経路、site effect によって決まる。経験的に観測点ごとに係数 α を決めることは可能であり、多点の係数 α を用いることにより、観測点への依存性を軽減することが可能である。

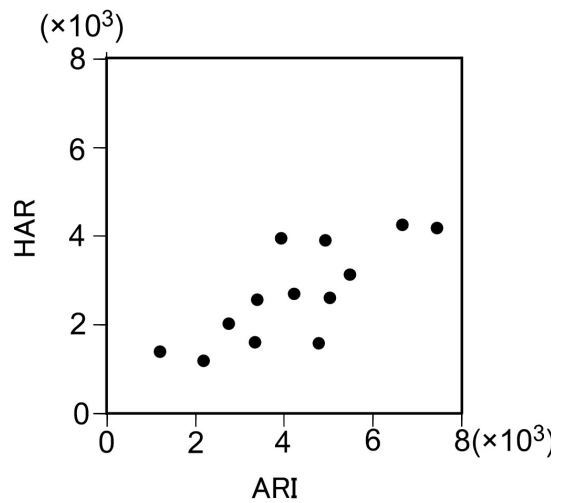


図 51 ハルタ山観測井（HAR）と古里観測井（ARI）の 2-3Hz の周波数帯域の 1 分毎のスペクトルの相関。

d) 超長周期地震による火山灰放出量の見積もりの試み

噴火に伴う火山性微動のスペクトルの周波数 2-3Hz 帯の振幅値と、噴火に伴う地盤の収縮変化から推定された地盤変動源における体積変化量から火山灰放出率を推定できる (Iguchi, 2016)。ここでは、卓越周期が数十秒の超長周期地震 (Very-long-period イベント, 以後 VLP イベント) を用いて火山灰放出率の推定を試みる。

i) 超長周期地震

噴火に伴う VLP イベントの波形解析から震源における体積変化量が議論されている (例えば, Chouet et al., 2005 のポポカテペトル火山のブルカノ式噴火)。噴火に伴う地震や地盤変動のソースにおける体積変化量は火山灰放出率 (放出量) と関係があるが、VLP イベントについて火山灰放出率 (放出量) との議論はまだなされていない。そこで、ここでは、VLP イベントと火山灰放出率 (放出量) との議論の前段階として、桜島の VLP イベントの振幅値と、伸縮計記録から茂木モデルを用いて推定された体積変化量 (Iguchi, 2016) との比較をする。

まず、桜島島内に設置されている広帯域地震観測点 (AR1, AR5, HIK, KMT5, KUR2) の記録を用いて、2018 年 7 月 1 日から 2019 年 3 月 31 日に桜島南岳にて発生した 267 の噴火に伴う地震波形から VLP イベントの検出を行った。噴火時の地震記録において、フィルターを施さない波形にて P 波初動到達時刻の 20 秒前から立ち上がり時刻から 80 秒後の 100 秒間をシグナル時間帯と定義し、P 波初動到達時刻の 150 秒前から 50 秒前の時間帯をノイズ時間帯と定義する。そして、それぞれの時間帯について上下動成分と水平動 2 成分についてスペクトルを計算し、0.05~0.1Hz の周波数帯域についてシグナル時間帯の振幅スペクトル平均値をノイズ時間帯の振幅スペクトルの平均値で割った値を SN 比と定義して、SN 比が 3 以上をある観測点の 3 成分とも満たし、別の観測点でもこの条件を満たす場合に VLP イベントが検出されたとする。その結果、20 個の VLP イベントが検出された。

ii) 解析

次に、VLP イベントの振幅値を求める手順を示す。まず、地震波形に 0.05~0.1Hz のバンドパスフィルタを施す。そして、目視にてシグナルが認められた時間を含むように時間窓を設定して、波形を切り出し、VLP シグナル波形とする。そのため、VLP シグナル毎に時間窓の長さは異なる。そして、VLP シグナル波形からエンベロープ波形を計算して、時間積分して総和を求める。求めた総和を各成分の積算振幅値と呼ぶ。以上の手順を、各観測点の各成分について行う。そして、前述の SN 比が 3 以上の成分について積算振幅値の平均値を求める。

まず、VLP イベントの複数の観測点の上下動成分の積算振幅値の平均値と該当する噴火に伴う伸縮計の変化から推定された体積変化量の関係を図 52 に示す。また、3 成分の積算振幅値の平均値と該当する噴火に伴う伸縮計の変化から推定された体積変化量の関係を図 53 に示す。上下動成分および 3 成分の積算振幅値の平均値と体積変化量は正の相関が認められ、直線回帰を行ったところ、3 成分の積算振幅値

の場合の方が、決定係数が若干高いことから、上下動よりも3成分の方が積算振幅値の平均値と体積変化量は正の相関が良いと言える。

以上により、噴火に伴うVLPシグナルの積算振幅の平均値と伸縮計記録から推定される体積変化量には正の相関があると言える。体積変化量は火山灰放出量と比例関係にある(Iguchi, 2016)。したがって、VLPシグナルから火山灰放出量の推定手法を検討していくことが火山灰放出量のモニタリングに資すると言える。特に、火山灰放出量の推定に有用な観測坑道設置の伸縮計が存在しない火山において、広帯域地震観測を行っている場合の火山灰放出量モニタリングを想定して、VLPシグナルと火山灰放出量の関係の導出を今後行っていく必要がある。

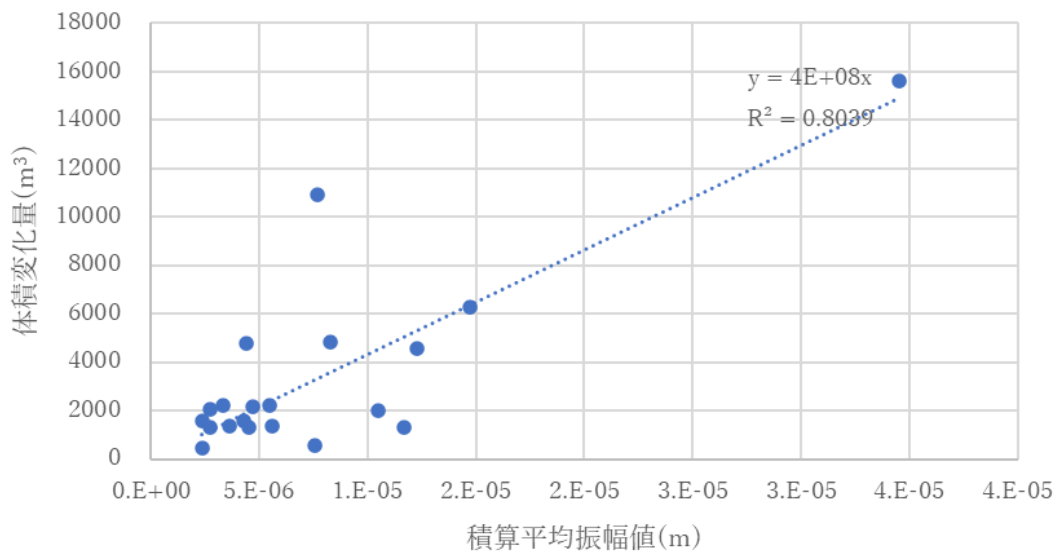


図 52 上下動成分の積算振幅値の平均値と伸縮計記録から計算された体積変化量との関係

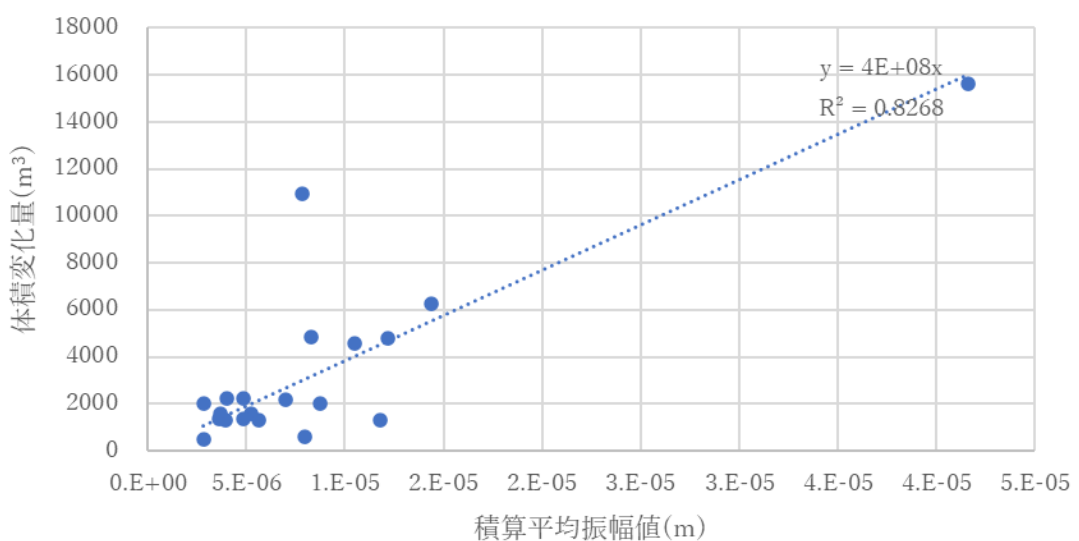


図 53 3成分の積算振幅値の平均値と伸縮計記録から計算された体積変化量との関係

e) 火山灰放出量推定式の桜島以外の火山への適用

桜島火山の噴火を対象にした火山灰放出量の推定式は、長期の噴火活動期間について適用可能であることが確かめられた。これを他の火山に適用し、推定式適用の拡張を図る。ここでは、長期間、噴火活動を続けている吐噶喇列島の諏訪之瀬島と、インドネシアのシナブン火山の噴火を対象にする。

i) 諏訪之瀬島火山

諏訪之瀬島は、九州の南方、吐噶喇列島のほぼ中央に位置する成層火山である。1813年には大規模噴火が発生し、1883-1884年には溶岩を流出した。20世紀以降は、御岳山頂から北東に開いた馬蹄形カルデラ内に火砕丘を形成するブルカノ式噴火とストロンボリ式噴火を繰り返している。2000年12月に火砕丘の北東側に新火口を形成して一時的に噴火活動は活発化したが、その後、噴火活動は低下傾向にあった。しかし、2020年12月から爆発活動が再び激化し、活発な爆発活動を続けている。

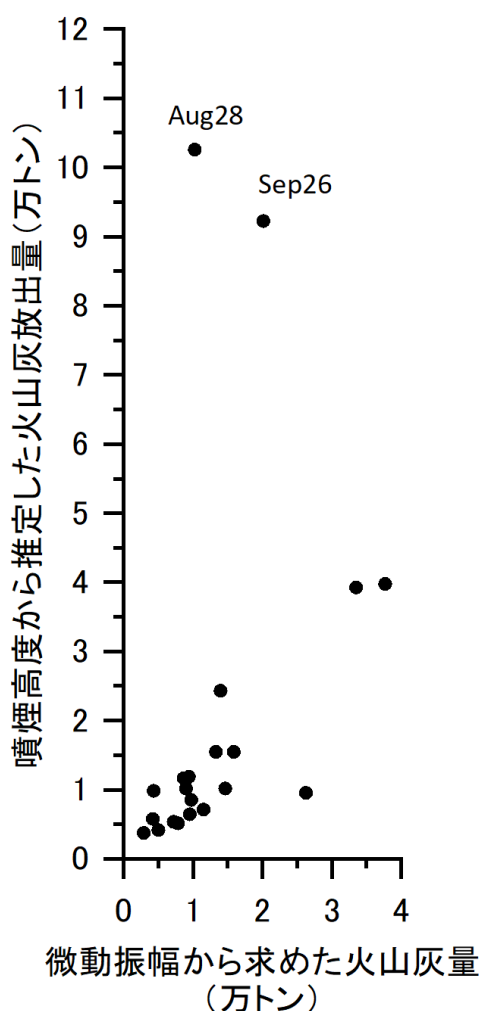


図 54 噴煙高度から算出した火山灰放出量と火山性微動振幅のみの推定式から求めた火山灰放出量の関係。

ここでは、2021年に発生した爆発のうち、福岡管区气象台により噴煙高度が3000m以上に達したと観測された噴火について、噴火微動の振幅と火山灰放出重量の関係を検討した。

桜島に比較して、諏訪之瀬島における検討には以下の問題がある。1つは、全方位を覆う降灰観測点がないこと、もう1つは高精度の地盤変動観測点がないことである。桜島においては、南岳から50km以内に62点の降灰観測点があるが、諏訪之瀬島では島の南麓に4点の降灰観測点があるのみである。そこで、(3)式を用いて、噴煙高度から放出率を求め、火山性微動の継続時間を掛けることにより、火山灰放出量とした。ここでは桜島の平均的な値 $k=200$ を用いた。また、(1)式において地盤変動の効果を表す第2項を無視することにより、火山灰放出量を推定した。地震動については、桜島と同様に、2~3Hzの周波数帯域を用いた。

噴煙高度から算出した火山灰放出量と火山性微動振幅のみの推定式から求めた火山灰放出量を比較して図54に示す。同図においては、(1)式の地盤変動の項を無視しているため、噴煙高度から求めた火山灰量に合うように、係数 α を桜島の200倍として算出した。8月28日と9月26日の噴火を除い

て両者の間にはよい相関関係がみられるので、火山性微動を用いることにより、火山灰放出量を推定することが可能である。例外とした8月28日と9月26日の噴火では、噴煙高度がそれぞれ、4800mと5400mに達しているので、火山灰量が大きく見積もられた。元々、(3)式を用いて噴煙高度から火山灰量を見積もることは誤差が大きくなること、噴煙高度は気象条件等にも依存することが考えられる。

2021年には噴煙高度が3000m以上となる噴火が26回発生したが、そのうち25回は気象庁が「噴火」と定義する空振振幅が10Pa未満(榑戸原、 $\Delta=4.0$ km)で、噴煙高度1000m以上の爆発力の弱い噴火である。一方、空振振幅が10Pa以上のものは「爆発」と定義されている。「爆発」は概して噴煙高度が低く、1000m以下のものが多数を占める。また、「爆発」に伴う噴煙に対しては、レーダーエコーが検出できないことも多いことから、「爆発」は多量の火山灰を含むとは考えにくい。一方、「爆発」に伴う地震動の振幅は、初動付近を除いて、「噴火」とオーダー的には大差がないため、係数 α を桜島の200倍とする(1)式の適用は、「噴火」に限定的なものであり、「爆発」については係数 α を別途検討する必要がある。

ii) シナブン火山

シナブン火山はインドネシア・スマトラ島北部、トバ湖の北にある成層火山である。火山体は溶岩流と火砕流堆積物からなる。17世紀以降、噴火は発生していなかったが、2010年8月下旬に新たな噴火活動が始まった。2010年8月と9月の噴火はすべて、水蒸気爆発であった。その後、しばらく静穏であったが、2013年9月に2回目の水蒸気爆発の活動が再開し、噴出する火山灰に新鮮なマグマ物質が含まれるようになったのち、12月には山頂に溶岩ドームが出現した。2014年に入ると溶岩ドームは流下を始め、溶岩流を形成するとともに、溶岩ドームの崩落は火砕流を頻繁に発生させた。2014年と2015年の噴火のほとんどは、溶岩ドームの崩落による火砕流であった。ところが、2015年11月ごろから、桜島や諏訪之瀬島の噴火と同様に、噴煙柱のみを形成し、火砕流を伴わない噴火が発生するようになり、2016年以降は、噴煙放出のみの噴火の発生回数が急増した。

火砕流は火山砕屑物が火山体の斜面を流れ下る現象であることから地震動を励起しやすく振幅の大きい火山性微動を伴う。一方、噴煙放出型の噴火では、火山性微動の振幅が1/5程度に小さいことから、火山性微動と火山灰放出の関係を検討するためには、火砕流と噴煙放出型の噴火では、異なる扱いをする必要がある。ここでは、まず、噴煙高度が火口縁上3000m以上に達した噴煙放出型の噴火を解析することにする。

シナブン火山には桜島のような降灰観測点はない。また、高精度の地盤変動観測点もない。ここでは、諏訪之瀬島に倣い、(3)式を用いて、噴煙高度から放出率を求め、噴火に伴う火山性微動の継続時間を掛けることにより、火山灰放出量とした。また、諏訪之瀬島と同じように $k=200$ とした。また、(1)式において地盤変動の効果を表す第2項を無視することにより、火山灰放出量を推定した。地震動については、山頂から2.6 km北にあるLaw Kawar観測点の短周期地震計のデータの2~3Hzの

周波数帯域を用いた。シナブン火山においても桜島、諏訪之瀬島と同様に、2~3Hzの周波数帯域の地震動が卓越している傾向がみられる。

噴煙高度から算出した火山灰放出量と火山性微動振幅のみの推定式から求めた火山灰放出量を比較して図 55 に示す。図 55a においては、(1) 式の地盤変動の項を無視しているため、噴煙高度から求めた火山灰量に合うように、諏訪之瀬島と同様に係数 α を桜島の 200 倍として算出した。シナブン火山の場合、噴煙高度から算出した火山灰放出量と火山性微動振幅のみの推定式から求めた火山灰放出量の間に関連関係が見られない。また、両者の間に 1 桁の差がある。そこで、噴煙高度から火山灰放出率を推定する式においてに $k=300$ とした場合の両者の関係を図 55b に示した。相関には改善は見られないが、どちらの火山灰放出量も概ね 1 万トン以下の範囲に収まり、オーダーとしては一致した。両者の相関がよくないことの原因として (3) 式は噴出率に対して噴煙高度の 4 乗を計算するものであることから、大きな誤差を伴うことがあげられる。また、シナブン火山の地震記録はすべて FM テレメータによるアナログ記録であり、振動記録の一部ではあるが、振幅の大きい微動は振り切れてしまい過小見積となる（諏訪之瀬島の記録はデジタル記録であり、火山噴火の振動程度では振り切れない）。シナブン火山では、 $k=300$ とした方が地震動から推定する火山灰放出量をうまく説明できる。 k が大きい方が、同じ噴出率に対して高い高

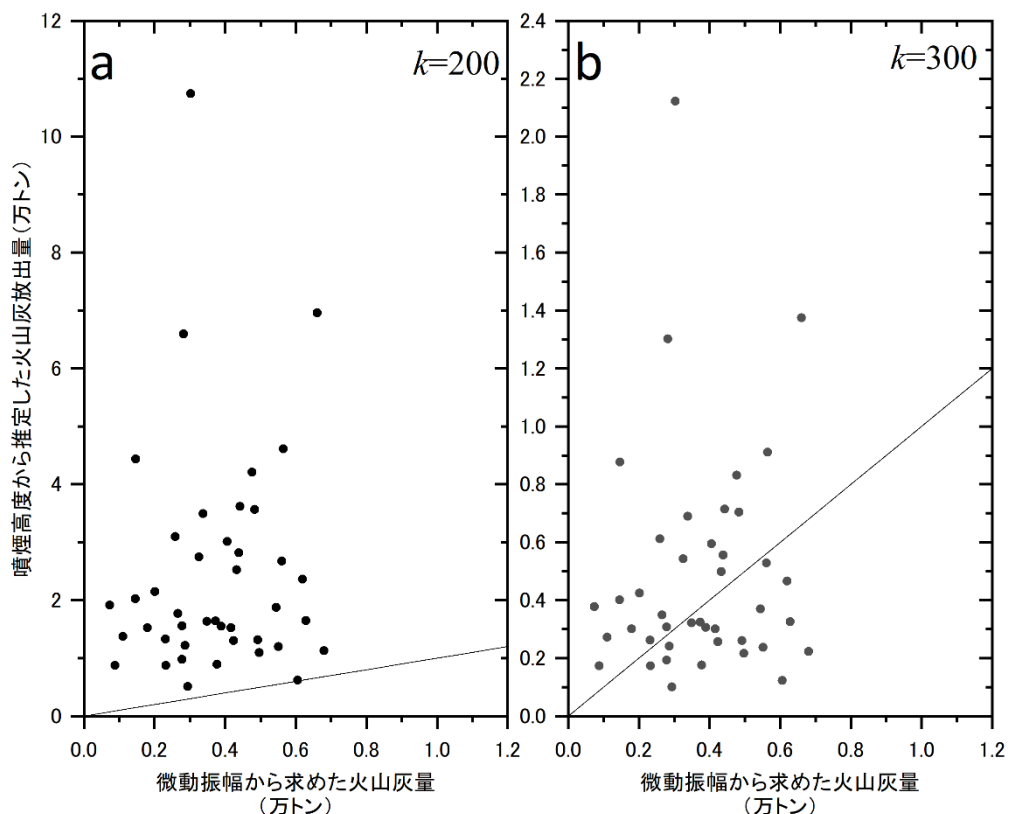


図 55 火山性微動振幅のみの推定式から求めた火山灰放出量と噴煙高度から算出した火山灰放出量の関係。a) $k=200$ 、b) $k=300$ 。直線は両者の比が 1:1 となる場合を示す。

度まで噴煙が到達することを意味するので、諏訪之瀬島よりも赤道直下(北緯3度)にあるインドネシアにあるシナブン火山の噴煙が上昇しやすいのかもしれない。この理由の1つとして大気中の水蒸気量が増えられるが、海域にある諏訪之瀬島でも大気中の水蒸気量は多いと推測されることから、詳細な検討が必要である。また、シナブン火山は、溶岩ドームの崩落も繰り返し発生しており、山頂またはその直下の極浅部に熱源を持っている。火口における熱量の違いを反映しているのかもしれない。いずれにしても噴煙高度から噴出率を推定するのはオーダーに及ぶ誤差を伴うので、変動しやすい大気中の影響を受けない地震動を用いて火山灰放出率の時間関数を推定した方がよいのかもしれない。

f) 噴煙シミュレーションによる噴煙高度の検討

課題 C3 と連携し、噴煙柱形成・火山灰拡散を同時に再現する高精度シミュレーションを実行した。これにより、ブルカノ式噴火の噴火強度に対する噴煙高度と火山灰堆積分布の応答に関するデータベースを充実させた。

i) 火山灰粒子の噴煙からの離脱

爆発的噴火における火山灰輸送と堆積の予測のため、課題 C3 と連携し、数値研究を実施した。短時間で噴煙放出をするようなブルカノ式噴火を対象とし、火山噴煙挙動とそれに伴う火山灰輸送の再現を試みた。課題 C3 で開発・改良を進めている3次元モデル SK-3D では、圧縮性流体力学スキームで計算される速度場にトレーサー粒子を乗せることで火山灰が大気中に運ばれ、噴煙から離脱すると終端速度で降下する様子を再現できる。大気風がない状態を初期条件とし、噴出時間を 0.1 秒～

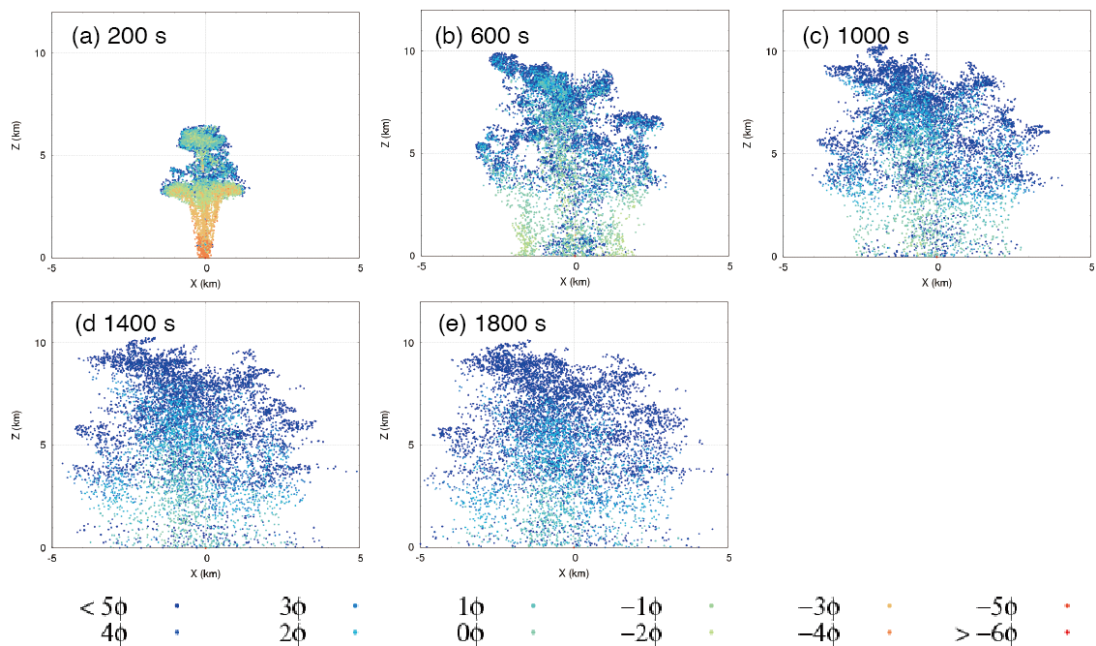


図 56 ブルカノ式火山噴煙の3次元数値シミュレーション。大気中における火山灰粒子分布の時間発展を示す。色は火山灰粒子のサイズ (ϕ スケール) を表す。

100 秒程度の噴煙シミュレーションを実行した結果、火山灰粒子サイズによって到達高度や降灰分布が異なる様子を再現した。噴出時間が 10 秒の条件では、比較的大きな火山灰粒子は噴火開始から数 100 秒で 5km より低い高度から降下を始めた (図 56)。一方、細かな粒子は高度 10km 程度まで達し、その後時間をかけ降下した。終端速度が小さい非常に小さい粒子は大気中に滞留し、計算時間 1800 秒内では地表に達しなかった。

ii) 噴火時間の依存性

噴火継続時間を変えた場合、噴煙高度は非線形に変化した (図 57)。噴出量総量を固定し、噴火継続時間を 0.1 秒、10 秒、100 秒と変化させた。そのため、噴出率 (kg/s) が異なる。また、噴出速度をマッハ数 1 と固定したため、火口半径が異なる。計算の結果、噴火継続時間が 0.1 秒から 10 秒になると噴煙高度は 5km から 10km に増加した。噴火継続時間が 100 秒まで長くなると、噴煙高度は 7km へと低下した。それに伴い、火山灰輸送の高度と火山灰の堆積分布が変化した。計算条件によっては空間分解能が低く計算結果にグリッド依存性があること、細かな粒子が堆積するまでには更に長時間の計算が必要であるなどの課題も明確になった。

これらのシミュレーションから得られた結果は、様々な噴火条件に対する噴煙高度と火山灰堆積分布についてのデータベースに追加される。

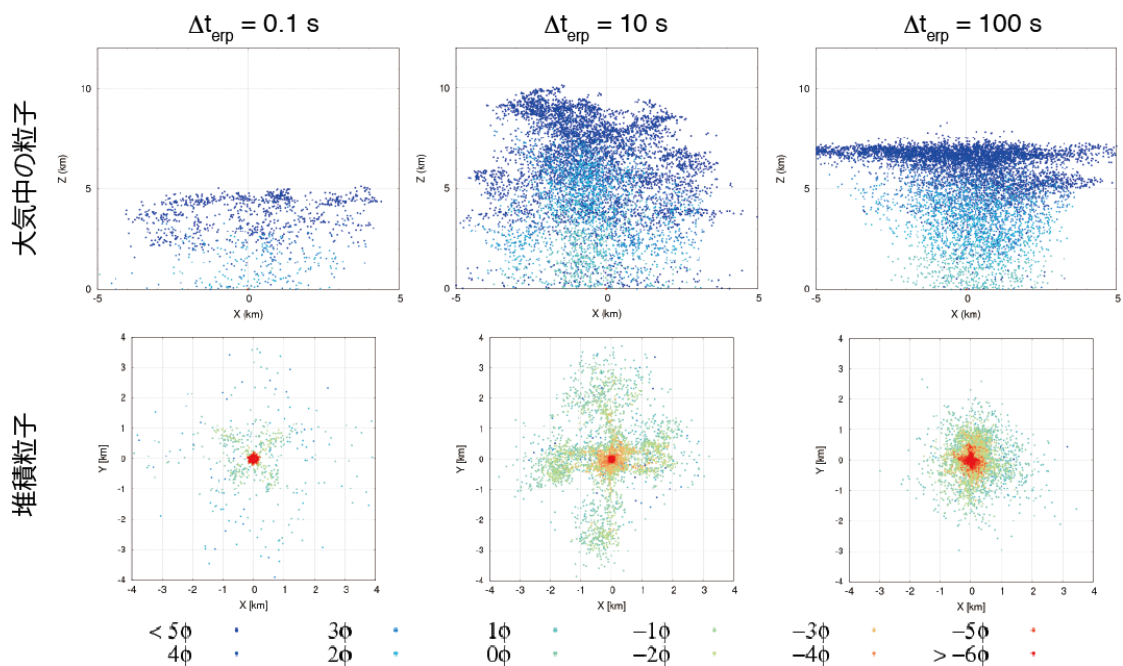


図 57 噴火継続時間を変えた場合のブルカノ式火山噴煙の 3 次元数値シミュレーション。大気中における火山灰粒子分布と堆積分布を示す。

g) PUFF モデルによる火山灰の輸送拡散予測と MP レーダーの実測の同化実験

i) PUFF モデルによる火山灰の輸送拡散予測の問題の背景

火山灰粒子の運動をラグランジュ的に追跡する PUFF モデルは、航空安全を目的として開発されたモデルであり、火口から数百キロの範囲への輸送拡散を予測するモデルである。最初のモデルは噴煙高度を入力パラメータとして火口に円柱状の噴煙コラムを立て、それが気象庁から提供されるリアルタイムの風によってどのように拡散するのかを数値予報モデルとして予測した。初期の円柱状の噴煙はその後、傘雲などに変形させるなどの改良が加えられた。Tanaka and Iguchi (2019) はこの PUFF モデルに桜島周辺の地震計や傾斜計からリアルタイムで算出される噴出率と噴煙高度を組み合わせることで、噴火開始時刻に噴出率と噴煙高度を自動入力する PUFF モデル予測システムへと拡張した。

しかし、地震計等による噴煙高度の推定には大きな誤差が含まれる。気象庁から配信される風のデータもリアルタイムで自動化する際には解析値ではなく近未来の予報値が用いられるため大きな誤差を含むことになる。そこで、Tanaka et al. (2020) では MP レーダーデータによる噴煙の 3 次元的な分布の実測を PUFF モデルの数値予測に同化する試みがなされた。PUFF モデルの初期値が推定値でなく、現地での実測値に置き換えられたことは、予測精度の面で画期的な改善と言える。対象とした事例は 2019 年 11 月 8 日 17:24 UTC の桜島噴火であり、20dBz 以上の反射強度を持つ MP レーダーデータが用いられた。地震計等から推定された噴出率と噴煙高

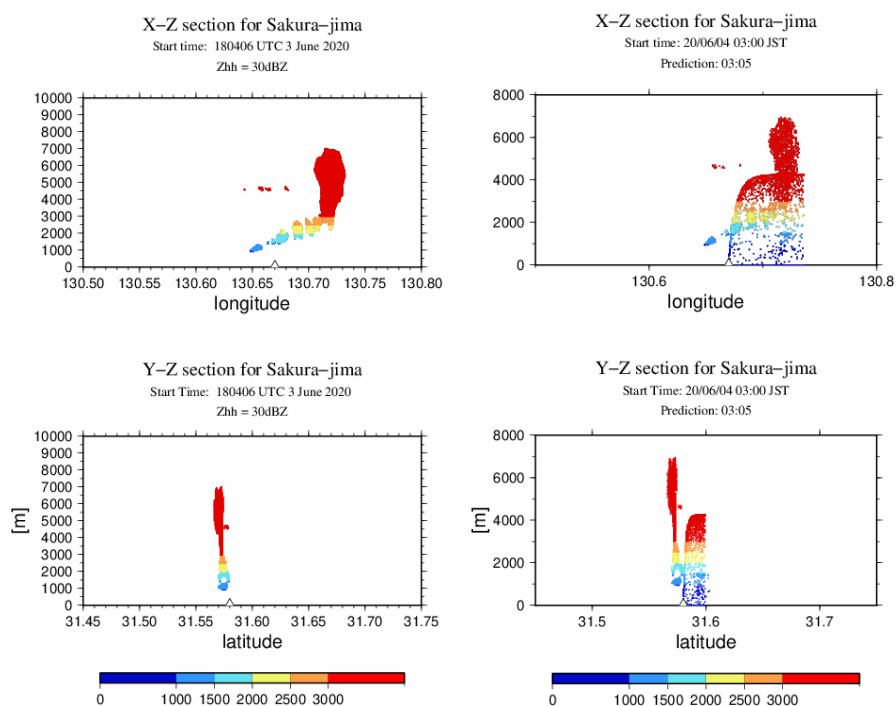


図 58 2020 年 6 月 3 日 17:59 UTC の桜島噴火の東西(X-Z)南北(Y-Z)断面。色は高度を示す。MP レーダーの観測値(左)に PUFF モデル予測を重ねた結果(右)の同化法の例。

度を用いた噴煙予測の分布に、同時刻に MP レーダーで観測された噴煙粒子を足し 2 で割るような最も原始的なデータ同化が取り入れられた。実測データがモデル予測に同化されたという意味では画期的であるが、将来的には粒子フィルターなどの最新のデータ同化技術の導入が課題として指摘された。

ii) 粒子フィルターによるデータ同化手法の導入

そこで、2021 年度の研究テーマとして、火山灰輸送拡散モデル PUFF に、MP レーダーの観測データを同化して予測精度を向上させるために、この粒子フィルターによるデータ同化手法の導入が検討された。粒子フィルターとは Bayes の定理に基づいて粒子の位置の尤度を計算し、観測とかけ離れた尤度の低い粒子を削除する代わりに、観測に近い領域に新たに粒子を置くという手法である。対象とした事例は 2020 年 6 月 3 日 17:59 UTC の桜島噴火であり、30dBz 以上の反射強度のデータが用いられた。図 58(左)は MP レーダーから得られた噴煙の鉛直断面である。この日は雨天で 20dBz では全域に雨滴が見られた。40dBz では噴煙のコアだけが検出されることを利用して MP レーダーの 30dBz のデータに尤度解析を行い、尤度の低い粒子は雨滴と判定して噴煙のみを抽出した。このレーダーによる実測に PUFF モデル予測データを重ねたものが図 58(右)の鉛直断面である。継続的な噴火により火口から風下に延びる噴煙が重なっている。MP レーダーは実測ではあるがスナップショットであり見えない領域もあるので、地震計等から推測される噴出率等にも重要な観測

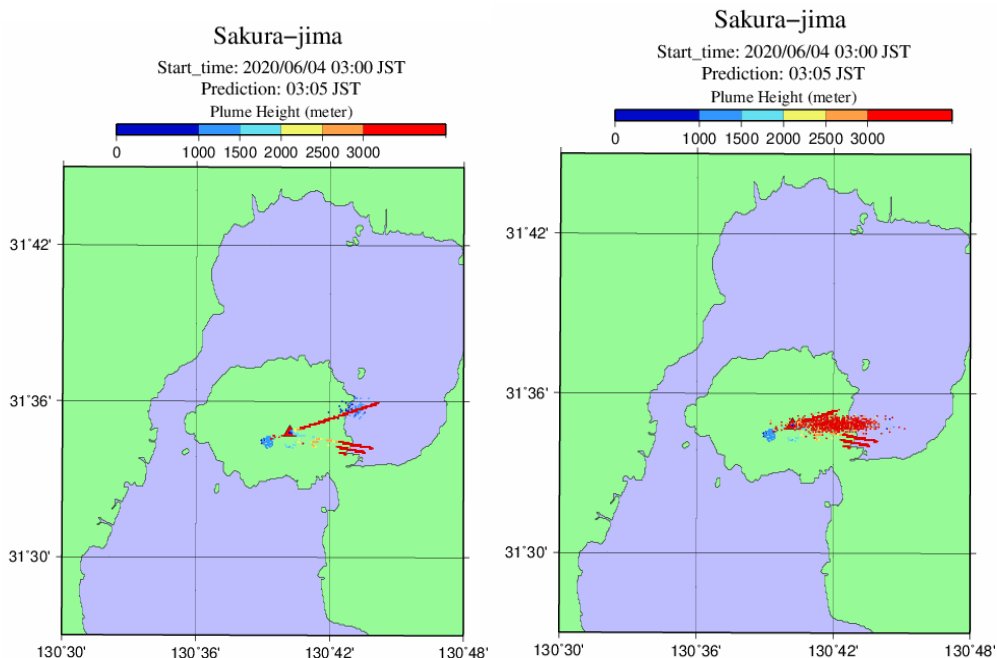


図 59 2020 年 6 月 3 日 17:59 UTC の桜島噴火の水平分布。色は高度を示す。MP レーダーの観測値に PUFF モデル予測を重ねた同化法（左）の結果と、粒子フィルターによるデータ同化法（右）の結果の比較。

情報が付加されているため、両者を最適解として同化することが理想となる。先行研究で行ったような予測と観測を足して2で割るような簡単な同化では、東西断面のように両者が重なっている場合は良いが、南北断面のように全く重ならない場合には問題となる。天気予報モデルでは予報のアンサンブルメンバーが観測値と全く重ならない時にはデータ同化法として深刻な問題となるが、火山灰粒子ではそのような事例が頻繁に起こると推測される。

本研究では先行研究で初めて導入された同化手法を粒子フィルターにより改善し、予報精度の改善が試みられた。図 59(左)はモデル予測(火口から線状に延びる線)とMPレーダー観測(半島付け根の塊)を重ねたもので、両者は全く重ならない。そこで図 59(右)では、観測粒子は残し、モデル粒子に対しては尤度計算を行い、尤度の低い粒子を削除する代わりに尤度の高い領域に新たな粒子を再生産するという粒子フィルターのアルゴリズムを導入した。粒子の総数は同化前後で同じとした。観測と同様にモデル予測も重要な情報を持っているとの同化の特徴が反映されている。図 60は粒子フィルターを用いてデータ同化を行った後の火山灰の鉛直断面である。観測とモデル予測の両方の情報が反映された結果となっていることが分かる。

モデル予測が現地観測と合わない事例は火山灰噴煙予測には頻繁に見られるようである。その際にも、予測と観測の両方の特徴を反映した粒子フィルターは有効な同化手法と言える。今回の事例は手法の開発のための1事例の紹介であったが、今後の課題はMPレーダーが提供する複数枚のスナップショットを実測値として一連のモデル予測データに同化することである。

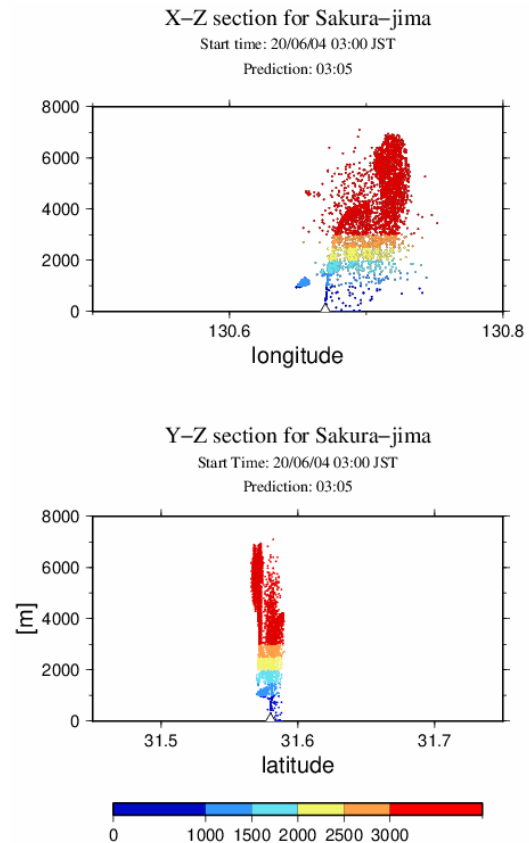


図 60 2020年6月3日17:59 UTCの桜島噴火の鉛直断面。色は高度を示す。粒子フィルターによるデータ同化の結果。

4) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

気象モデル WRF による高分解能シミュレーションおよび分解能を変えたシミュレーションから、火山の地形の影響を受けた拡散場の再現性の評価に基づき、火山灰拡散を精度良く予測するためのシミュレーション条件を評価した。特に、火山地形の影響を受けた鉛直風の影響を適切に取り入れ、火山地形の影響を取り込んだ火山噴煙のモデル化と気象モデルによる予測シミュレーションを実施した。予測精度の検証には、現地で実施される様々な実測データを活用した。ドローンによる上空の火山ガス、火山灰の濃度を計測し、鉛直プロファイルを把握した。取得したデータにより、地上観測機器や気象データとの比較、気象モデルの妥当性評価等を実施した。火山周辺の気流をさらに高精細化させるため、WRF から得られる気象場を境界条件とし、地形の凹凸、地表面の植生や構造物など気流を乱す粗度の影響を考慮して、非定常な乱流場の計算を行うことのできるキャノピーモデルを用いたラージエディシミュレーションを用いて、噴火時の火山周囲の気流性状を明らかにした。ディストロメータは火山灰粒子の落下速度も計測できるので、観測された落下速度から見かけの粒子比重を求めることにより、火山灰粒子の凝集の程度をさらに多くのデータを用いて評価した。

a) 風速ベクトルのその場観測

桜島を対象にドローンによる上空の風ベクトルおよび火山灰・火山ガス調査を実施した。さらに並行してドップラーライダーを用いて風の連続観測を行い、風の乱流強度の鉛直プロファイルの計測も行った。

i) 調査概要

調査は図 61 に示すハルタ山 (Site A)、黒神地獄河原 (Site B) および有村 (Site C) で実施した。今年度は主にドローンによる上空の乱流計測の可能性調査に取り組んだ。年間 2 回の観測キャンペーンを設定し、それぞれの調査期間は以下の通りである。各調査期間におけるフライト概要を表 10 および表 11 に示す。

・調査期間① 2021 年 9 月 27 日 (月) ~ 9 月 30 日 (木) の 4 日間

・調査期間② 2021 年 11 月 15 日 (月) ~ 11 月 18 日 (木) の 4 日間

なお、観測期間中に降灰を伴う噴火が発生せず、上空の火山灰・火山ガスデータを取得することはできなかった。

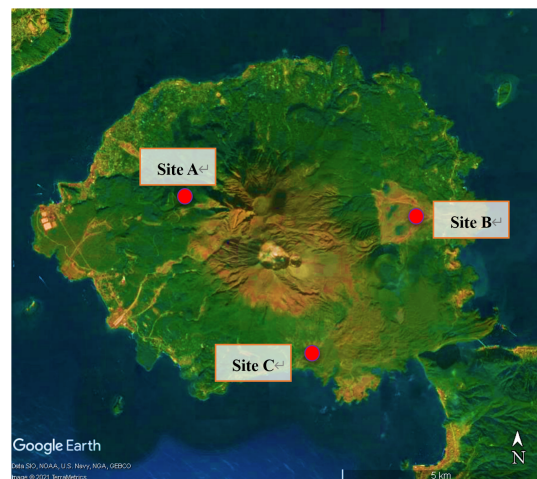


図 61 調査地点 (Site A : ハルタ山, Site B : 黒神地獄河原, Site C : 有村)

表 10 ドローンフライト概要（調査期間①）

Run	観測日時	観測地点	離陸時刻	着陸時刻	フライト内容
1	2021/09/27	ハルタ山	11:47:19	11:53:32	4 分間ホバリング (150m)
2			13:28:02	13:36:04	7 分間ホバリング (100m)
3			13:39:50	13:50:39	10 分間ホバリング (50m)
4	2021/09/28	ハルタ山	10:00:04	10:06:49	4 分間ホバリング (150m)
5		黒神地獄河原	14:48:30	15:01:58	10 分間ホバリング (300m)
6			15:10:00	15:21:10	8 分間ホバリング (200m)
7			15:29:00	15:41:05	10 分間ホバリング (100m)
8	15:43:48		15:57:01	3 分間ホバリング (300m, 200m, 100m)	
9	2021/09/29	黒神地獄河原	10:24:08	10:37:30	10 分間ホバリング (300m)
10			10:58:30	11:09:05	8 分間ホバリング (200m)
11			11:18:30	11:29:00	10 分間ホバリング (100m)
12			11:34:55	11:46:30	4m/s で 1000m まで上昇, 2 分間ホバリング, 2m/s で下降
13			11:52:36	12:02:20	2 分間ホバリング (300m, 200m, 100m)
14	2021/09/30	有村	10:20:17	10:33:44	10 分間ホバリング (300m)
15			10:41:07	10:53:35	10 分間ホバリング (200m)
16			11:02:35	11:14:15	10 分間ホバリング (100m)
17			11:27:20	11:40:17	4m/s で 1000m まで上昇, 2 分間ホバリング, 2m/s で下降
18			11:46:58	12:01:06	4m/s で 1000m まで上昇, 3 分間ホバリング, 2m/s で下降
19			13:12:00	13:22:30	3 分間ホバリング (400m, 100m)
20			13:27:40	13:39:50	3 分間ホバリング (500m, 200m)
21			13:48:40	13:59:25	3 分間ホバリング (600m) 1 分間ホバリング (300m)

表 11 ドローンフライト概要 (調査期間②)

Run	観測日時	観測地点	離陸時刻	着陸時刻	フライト内容
22	2021/11/15	有村	12:31:00	12:49:51	5 分間ホバリング (300m, 200m, 100m)
23			13:50:55	14:05:35	5 分間ホバリング (300m, 200m) 1 分間ホバリング (100m)
24			14:11:30	14:22:08	5 分間ホバリング (200m) 3 分間ホバリング (100m)
25			14:29:30	14:38:15	3 分間ホバリング (200m, 100m)
26			14:41:50	14:54:20	10 分間ホバリング (150m)
27			2021/11/16	黒神地獄河原	11:32:00
28	12:45:05	12:57:53			3 分間ホバリング (300m, 200m, 100m)
29	13:38:40	13:48:55			2 分間ホバリング (300m, 200m, 100m)
30	14:08:05	14:17:48			2 分間ホバリング (300m, 200m)
31	15:01:30	15:11:05			2 分間ホバリング (300m, 200m, 100m)
32	2021/11/17	有村	10:09:40	10:21:20	10 分間ホバリング (100m)
33			10:44:30	10:57:10	10 分間ホバリング (200m)
34			11:08:00	11:17:50	6 分間ホバリング (300m)
35			11:24:40	11:36:20	10 分間ホバリング (100m)
36			11:48:05	11:55:55	5 分間ホバリング (200m)
37			13:06:20	13:19:20	4m/s で 1000m まで上昇, 2m/s で下降
38			13:26:30	13:35:30	2m/s で 0~500m を往復
39			13:38:50	13:47:50	5 分間ホバリング (300m)
40	2021/11/18	有村	10:54:18	11:08:15	2m/s で 0~800m を往復
41			11:13:00	11:24:42	10 分間ホバリング (100m)
42			11:28:20	11:36:07	5 分間ホバリング (200m)
43			11:40:00	11:51:45	8 分間ホバリング (300m)
44			12:17:30	12:32:05	4m/s で 1000m まで上昇, 2m/s で下降
45			12:44:02	12:54:47	1m/s で 0~300m を往復

ii) 調査方法

ドローンは、6ローターのマルチコプター（SPIDER-CS6；ルーチェサーチ株式会社）を使用した。ドローンによる上空の風ベクトルおよび乱流計測においては機体中心に40cmのポールを立て、先端に2次元超音波風向風速計を取り付けた。乱流計測のため、高時間分解能で計測が可能なタイプの風速計（FT205；FT-Technologies）を搭載した。風向風速データは10Hzでデータロガーに収録し、フライト終了後にデータを回収した。また、桜島上空での火山灰および火山ガス濃度の分布計測では、PMセンサ（PM2.5モニター；ヤグチ電子工業株式会社）および火山ガスセンサ（QRAE3；RAE Systems）を搭載した。さらに、統合気象センサ（iMet-XQ2；InterMet Systems）を搭載し、気温、湿度、気圧の計測を行った。ドローンの外観を図62に示す。



図 62 調査で使用したドローンの外観（SPIDER CS-6）

ドップラーライダーは、三菱電機製のDIABREZZA Wシリーズ（LR-E1S5SB）を使用した。今回は、当日のドローン観測地点に合わせ、その近傍にドップラーライダーの設置・撤収を毎日実施した。観測高度は、45m～330mを対象として鉛直方向に15m間隔、計測時間は2秒間隔として連続観測を行った。ドップラーライダーの外観を図63に、主要性能を表12に示す。

表 12 調査に使用したドップラーライダーの主要性能

項目	性能
観測距離	40～250m(実際の観測距離はエアロゾル濃度等によって変化する。)
高度分解能	20m, 25m, 30m(最小4mごと)
走査パターン	スイッチ切替え方式
ビーム走査方向	0°(北)／90°／180°／270°／鉛直
レンジ数	20／40レンジ切替え
出力／表示データ	・水平風向風速の各レンジごとの分布 ・鉛直風の各レンジごとの分布 ・10分間平均風向風速データ
風速観測範囲	0～60m/s
風向風速更新周期	最速2s以内
レーザー波長	1.55μm帯の単一波長(JIS C 6802 クラス1Mに相当)
外部温度・湿度範囲	-20～+40℃, 0～100%RH
耐環境性	IP67, 重塩害仕様
本体寸法・質量	・W550×H550×D550(mm)(突起物は除く) ・50kg
電源条件	DC+24V ±10%
適合規格	CEマーク, RoHS

RH : Relative Humidity, RoHS : Restriction of Hazardous Substances

※) 三菱電機技報 Vol.89 No.3 2015 より引用



※) 三菱電機取扱説明書より引用

図 63 調査に使用したドップラーライダーの外観 (三菱電機製 DIABREZZA W)

iii) 調査結果

ドローンのフライトには、**エラー! 参照元が見つかりません。**0 および表 11 のフライト概要に示したように、一定高度でホバリングしながら観測するケースと上昇・下降しながら観測するケースの2種類ある。ここでは、ホバリングしながら観測した39ケースを対象として、ホバリング中の平均風速、風速の標準偏差および乱流強度についてドローンおよびドップラーライダーの観測値の比較を行った。図 64 に2021年9月29日のRun13のドローン観測の結果を示す。地上から300m, 200m, 100m

の3高度で2分間ずつホバリングを行ったケースである。また、図65に同日のドップラーライダー観測の結果を示す。このケースでは、風速8m/s程度の東風であったことが分かる。

ホバリングの時間は、表13に示すように1分～10分間に分布して一定ではない。このため、平均化の時間を2分間に設定し、ホバリング時間が2分間を超える場合は複数のケースに分割することとした。この結果、50ケースのホバリング数に対して解析対象のケース数は114となった。なお、平均化の時間はケース数の確保も考慮して設定したものである。

表13 観測高度別、ホバリング時間別の観測ケース数の一覧

観測高度	ホバリング時間 (分)										合計
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
50m									1		1
100m	1	4	5		1		1			6	18
150m					1						1
200m		4	4		5		1	1		2	17
250m											0
300m		4	2		3	1		1		2	13
合計	1	12	11	0	10	1	2	2	1	10	50

ドローン観測およびドップラーライダー観測による平均風速、標準偏差および乱流強度を比較した結果を図66に示す。図の横軸がドローン観測値、縦軸がドップラーライダー観測値である。平均風速は決定係数が0.94程度とよく一致しており、標準偏差、乱流強度ともバラつきがやや大きいものの一定の関係性が見られた。

次に、平均風速と乱流強度の関係について比較した結果を図67に示す。図の横軸は平均風速、縦軸は乱流強度であり、左上の図がドローン観測、右上の図がドップラーライダー観測の結果である。図中の黄色三角で示したプロットは、平均風速0.5m/s毎に区分し、その区分毎に求めた乱流強度の平均値である。ドローン観測では、平均風速の増大に伴い乱流強度が低下するという特徴が捉えられており、定性的には妥当と言える結果が得られた。下側に示した図は、上側の図の黄色三角を折れ線でつないで比較したものである。両者の変化傾向はよく類似しており、乱流強度はドローン観測の方が系統的にやや小さい値となっている。

以上より、ドローンによる観測値が概ねドップラーライダーの観測値と一致していることが確かめられた。また、バラつきはあるものの乱流強度の観測が可能であることが明らかとなった。今後は、上昇下降中のドローンによる乱流強度の観測や今回と異なる気象条件での観測を実施し、乱流強度観測の定量的評価を進める必要があると考えられる。

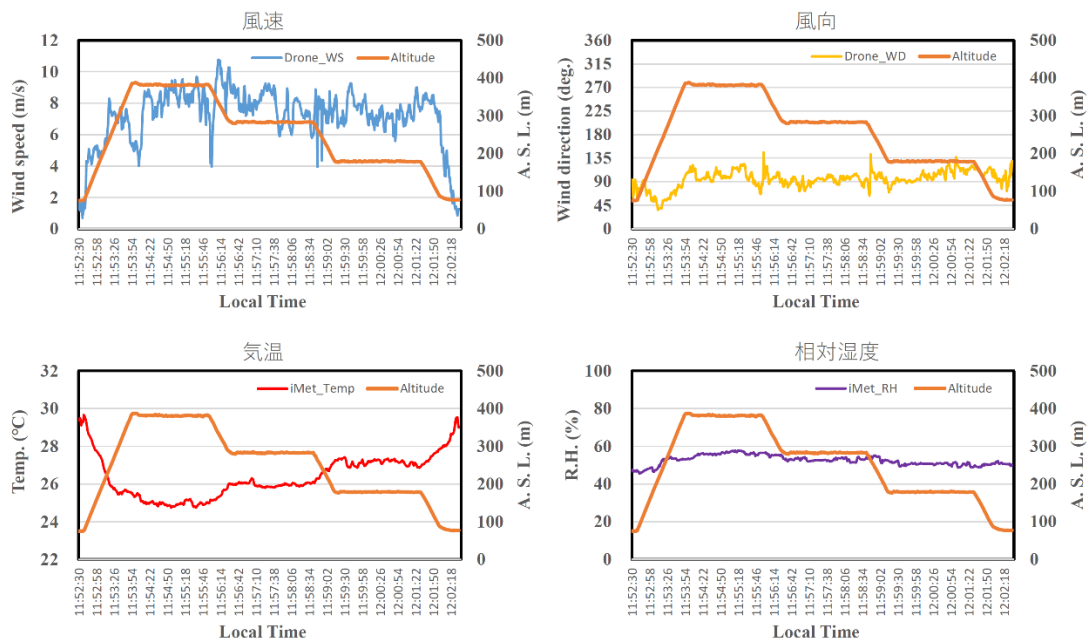


図 64 ドローンによる観測結果 (Run13 黒神地獄河原地点, 2021年9月29日)

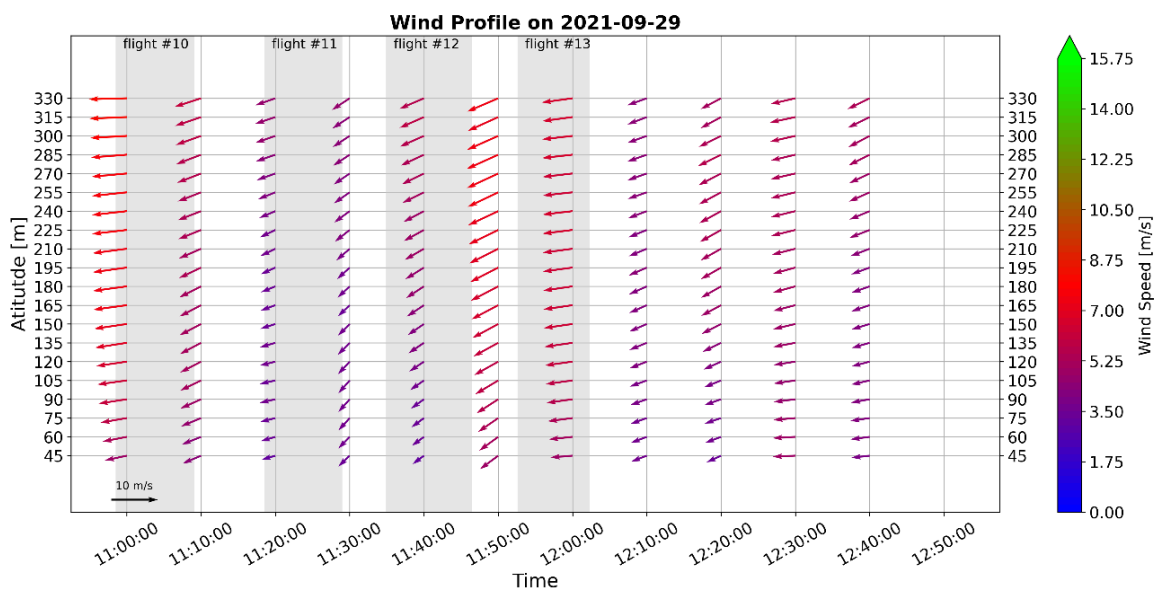


図 65 ドップラーライダーによる観測結果 (Run10~13 黒神地獄河原地点, 2021年9月29日)

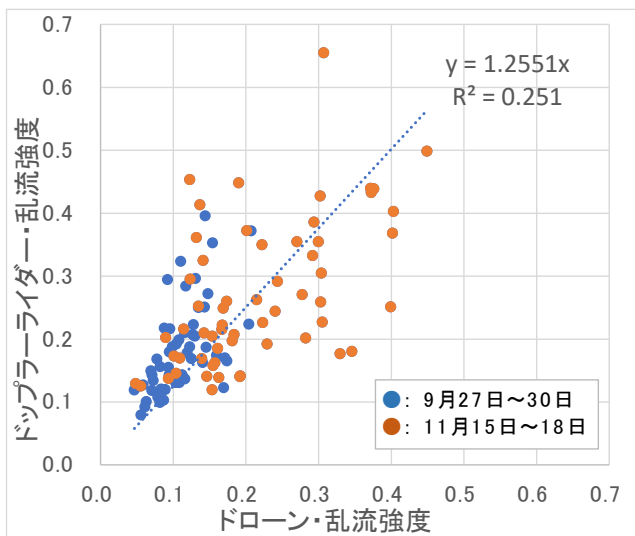
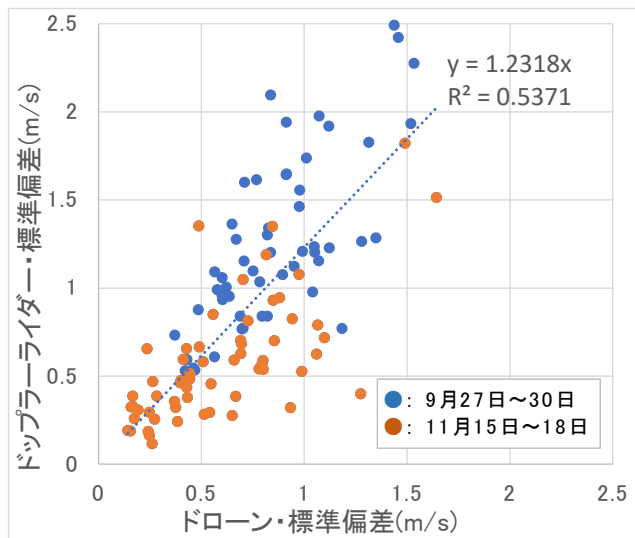
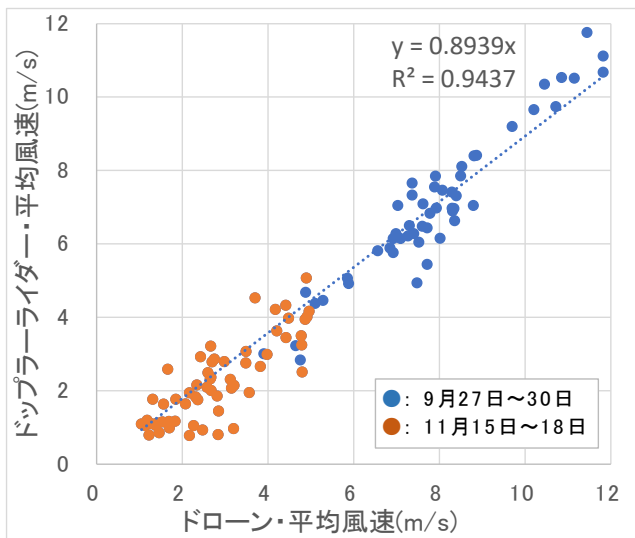


図 66 ドローン観測とドップラーライダー観測の平均風速、標準偏差、乱流強度の比較

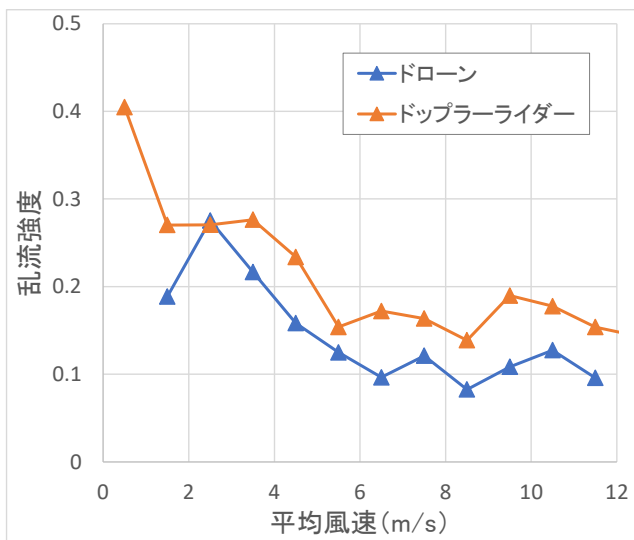
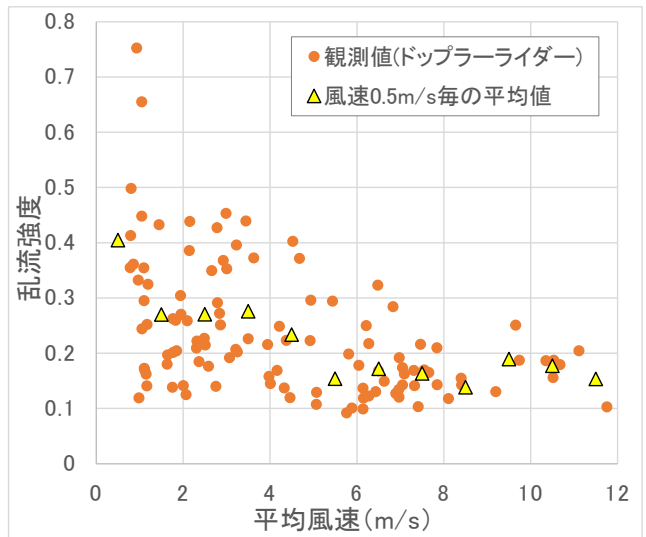
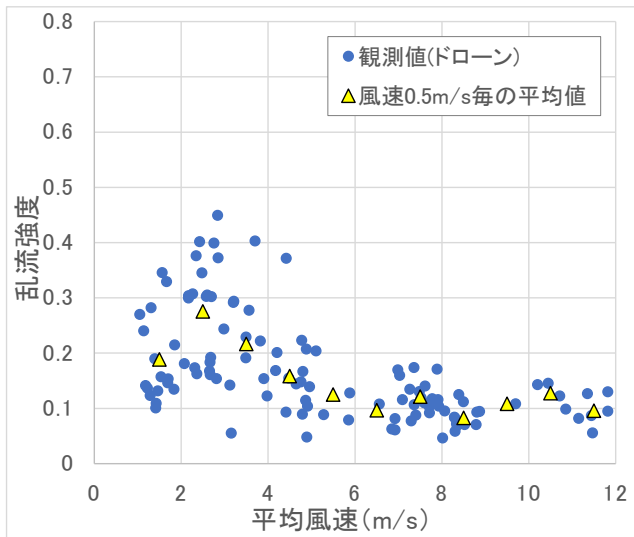


図 67 平均風速と乱流強度との関係。ドローン観測とドップラーライダー観測の比較

b) 桜島火山周辺域の高分解能気象シミュレーション

ここでは、メソスケール気象現象をターゲットとした数値気象モデル Weather Research and Forecasting (WRF)モデルを用いて、桜島火山および周辺の地形を高解像度で精緻に表現することで、地形の微細構造に起因した火山近傍の詳細な風速場や気象場を数値シミュレーションにより明らかにすることを目的としている。

i) 桜島の微地形

これまで、WRFモデルを使った高分解能シミュレーションにより、降灰の再現性について検討し、解像度依存性を明らかにしてきた。また、火山灰拡散および降灰の予測実験を行い、定量的な予測に要する解像度について調査した。さらに、高分解能シミュレーションにおいて、桜島および周辺地形の複雑さを精緻に再現した上(図 68)で、地形周りの風速場の再現性によって、異なる粒径の火山灰の降下パターンがどのように影響を受けるのかを調べた。図 68を見ると、桜島および周辺地域の地形には、現業気象予報モデルの解像度(5 km ないし 2 km)では表現しきれないような微細な構造があることが分かる。

令和3年度は、引き続き気象モデルの高分解能化によって生じる気流の変動性状、特に鉛直運動が降灰パターンに及ぼす影響を評価した。

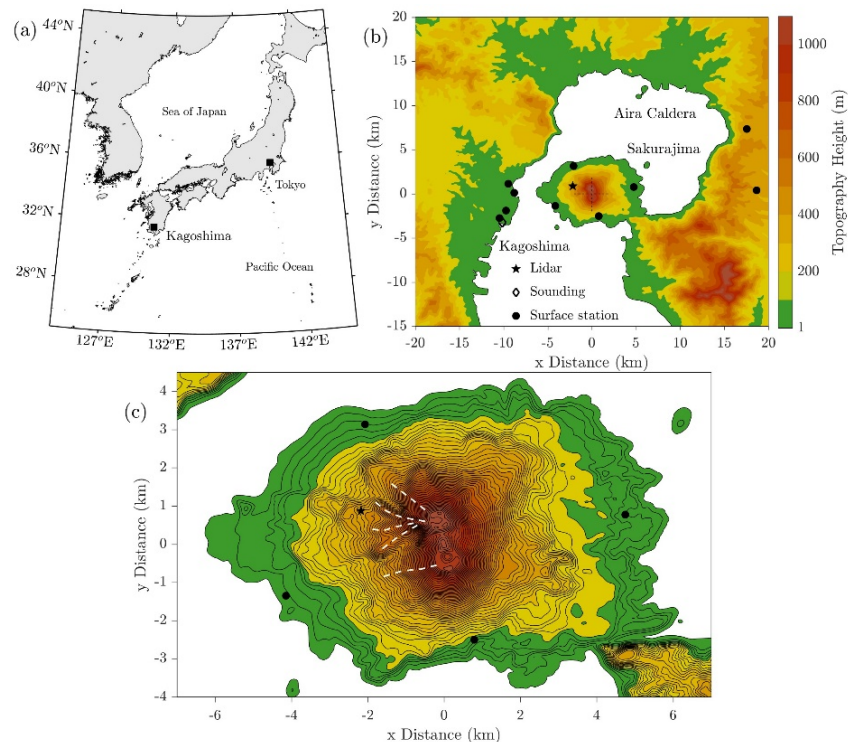


図 68 (a) 鹿児島島の位置、(b) 桜島および周辺地形、(c) 桜島の地形。

ii) 数値モデルの設定

本研究では、気象場の再現に領域気象モデル WRF Version 4 (Skamarock et al. 2019)を用いる。WRFモデルの計算領域の設定を図 69 に示す。一番外側の領域を Domain 1 とし、内側に Domain 2, Domain 3, Domain 4 をネストさせて領域設定し

た。Domain 1 と 2 の水平格子幅は、それぞれ 3150 m および 1050 m とし、これらの計算領域での乱流混合のパラメタリゼーションには境界層スキームを用いた。さらに内側の Domain 3 と 4 では、格子幅を 150 m および 50 m とし、乱流混合には LES モデルで用いる乱流スキームを用いた。また、鉛直方向には、格子間隔を下層ほど細かくし、上層ほど粗くするような伸縮型の鉛直レベルを設定した。WRF による領域シミュレーションで必要とされる気象場の初期条件・境界条件は、ヨーロッパ中期気象予報センター (ECMWF) の解析値 ERA5 を用いた。これら数値実験の設定は、2020 年度に実施したものと同様である。火山灰の輸送には、FALL3D (Folch et al. 2009) を用いた。

解析対象としたのは、2017 年 10 月 1 日の桜島噴火の事例とした。この事例に係る地上天気図および風速や大気安定度の鉛直分布を図 70 に示す。

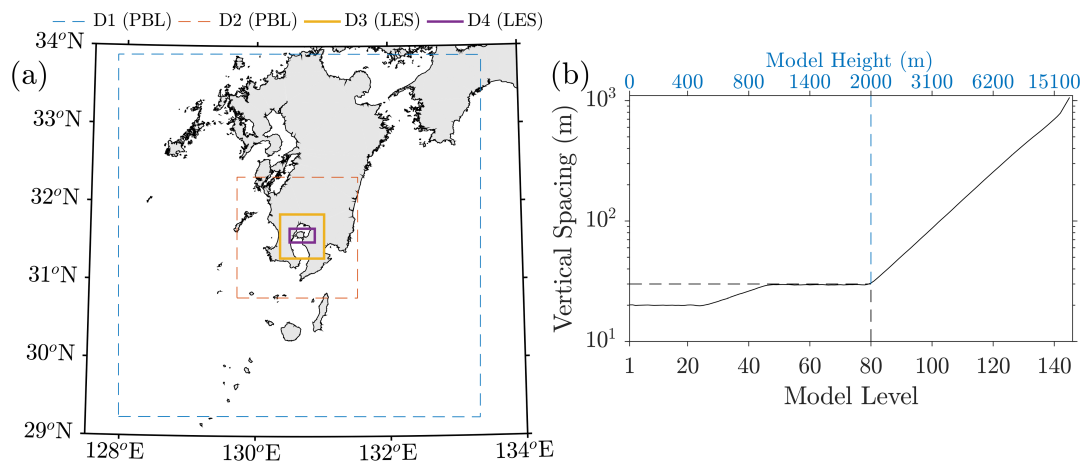


図 69 (a) WRF モデルの計算領域 (D1, D2, D3, D4), (b) 鉛直層数と鉛直格子間隔の関係

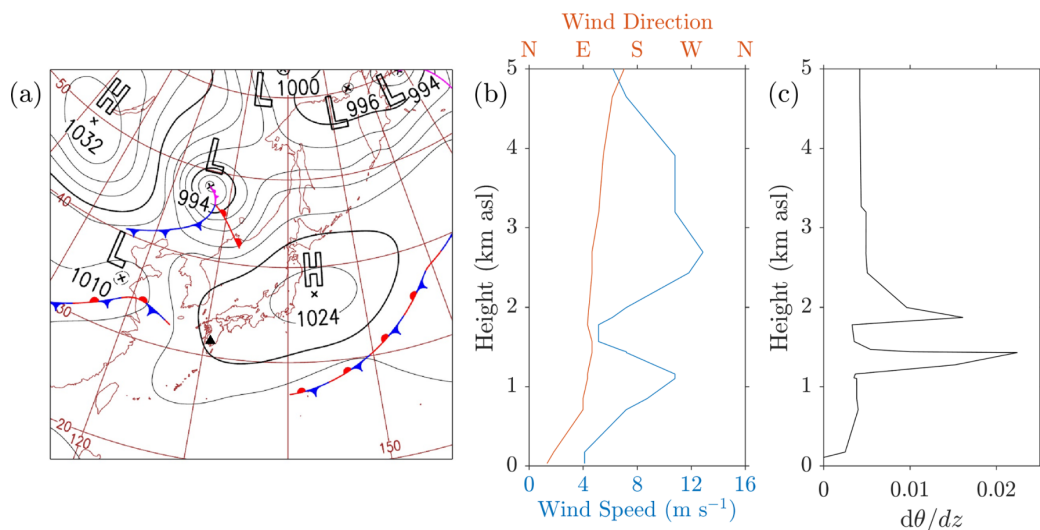


図 70 2017 年 10 月 1 日の気象状況 : (a) 天気図、(b) 風 (風速 : 水色 ; 風向 : 橙色) の鉛直分布、(c) 温位の鉛直勾配 (大気安定度) の鉛直分布。

iii) 結果

WRF モデルによる数値シミュレーションで得られた 2017 年 10 月 1 日の 6~9 時 (3 時間平均値) の乱流運動エネルギー (TKE) および風の様子を図 71 に示す。鉛直断面図を見ると、大気下層で東風が卓越する状況において、東風が桜島を乗り越える際、下流側 (火口の西側) でおろし風のように風速が強化されていることが分かる。火口のさらに下流側には上向きの運動が認められ、ハイドロリック・ジャンプに似た現象が生じていることが分かる。こういったハイドロリック・ジャンプが生じている状況において、TKE の数値が大きくなっていることから、気流の変動性が極めて高いと言える。水平断面図を見ると、地上風は桜島の火口付近を迂回するような流れ場となっており、これは海拔高度 600 m においても同様に現れている。これらの流れ場の特徴を気象モデルで再現できたのは、2020 年度に調べた通り、気象モデルの高分解能化により地形を精緻に表現することが可能となり、地形に励起されたハイドロリック・ジャンプや地形を迂回する流れが数値的に再現可能となったためである。また、TKE に分布に表現されるように、地形に励起される流れ場は非定常性が高くなり、火山灰の拡散や沈着にも影響を及ぼす。

このような鉛直運動による降灰の影響を調べるため、FALL3D 計算において火山灰の降下速度の違いによる感度実験を行った。具体的には、鉛直速度に対して 1 倍、0.5 倍、0.1 倍、0.01 倍のスケーリングパラメータを乗じた上で火山灰の鉛直移流項を計算した。その結果を図 72 の左列に示す。1 倍の場合、火山灰の降下速度が大きいため、火口近傍の沈着量が多くなる。スケーリングパラメータを小さくするほど、火山灰の降下速度が小さくなっていき、火口から離れた地点での沈着量が多くなる傾向にあることが分かる。異なる火山灰の密度を仮定して火口からの沈着量を計算すると、どの場合の密度であっても、スケーリングパラメータが大きい場合には火口付近の沈着量が多く、スケーリングパラメータが小さくなるほど火口から離れた場所での沈着量が増加する傾向にある (図 72 右列)。また、密度が小さくなるほど、より離れた場所での沈着量が増加していることも分かる。このように、鉛直速度が火山灰の沈着量に及ぼす影響は大きいことが分かり、これは先述の通り、山岳周りの鉛直運動が激しく変化することが関与している。

iv) まとめ

本研究では、気象モデルを水平格子幅 50 m という高解像度化することにより、桜島および周辺地域の地形を詳細に表現することを可能とし、地形の複雑性に起因する気流の変動やそれに伴う火山灰の拡散や沈着への影響を明らかにした。特に、地形に励起される鉛直運動に着目し、火山灰への沈着に鉛直速度の影響が顕著に表れることを示した。一般的に、山岳を越える流れ場の特徴は、大気の成層状態や風速の鉛直分布の考慮した安定度パラメータであるフルード数によって分類される。火山灰の拡散や沈着には鉛直運動が大きく影響を及ぼすことから、沈着量の違いはフルード数によってある程度整理できることが示唆される。こういった知見は、降灰量の推定や予測にも活用できると言える。

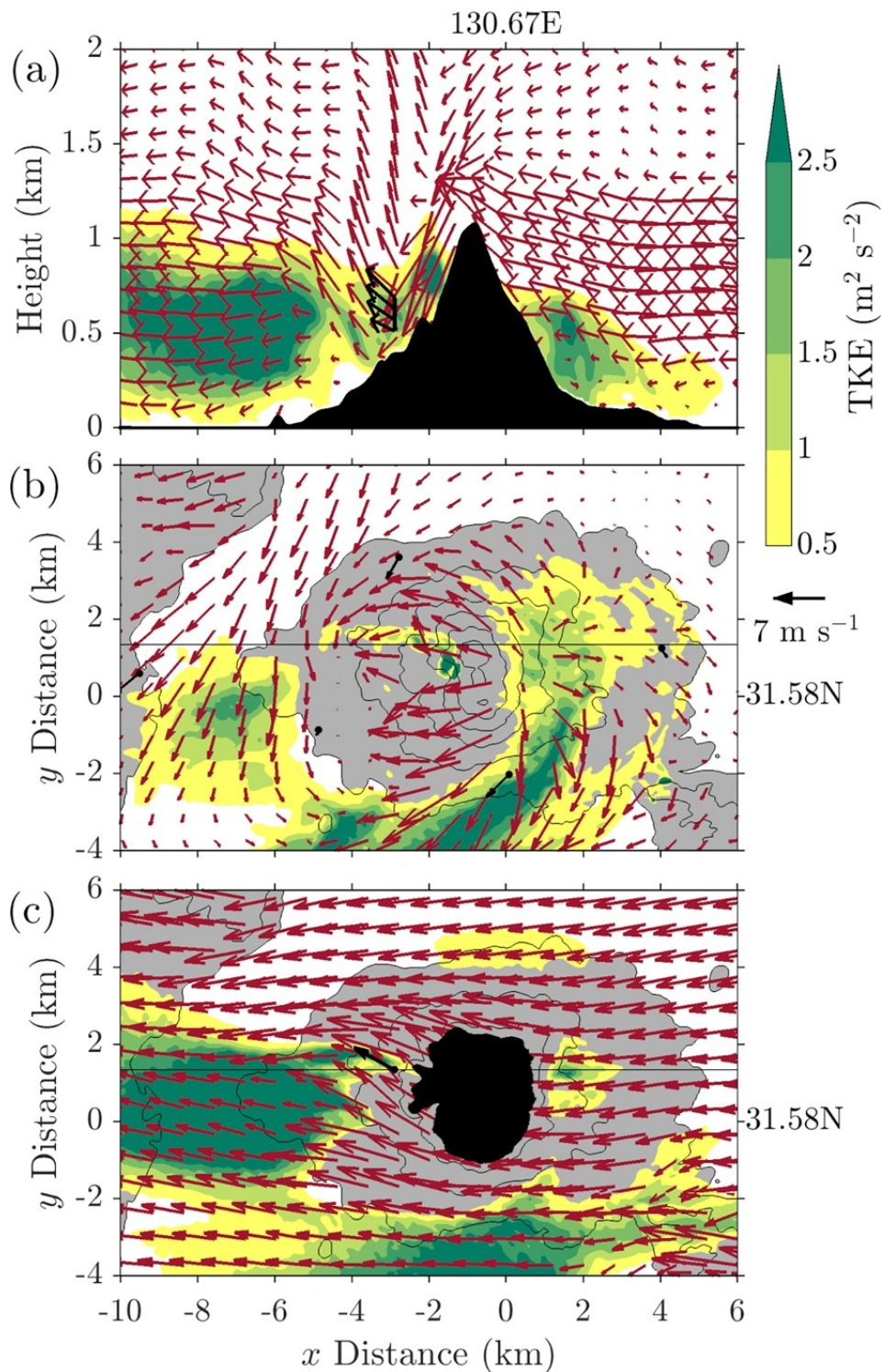


図 71 数値シミュレーションによる乱流運動エネルギー（カラー）および風（赤色ベクトル）。黒のベクトルは観測値を表す。(a) ハルタ山のライダー観測地点を通る東西・鉛直断面図、(b) モデル最下層高度での水平分布図、(c) 海拔高度 600 m での水平分布図。数値はすべて、0600-0900 JST の 3 時間平均値である。

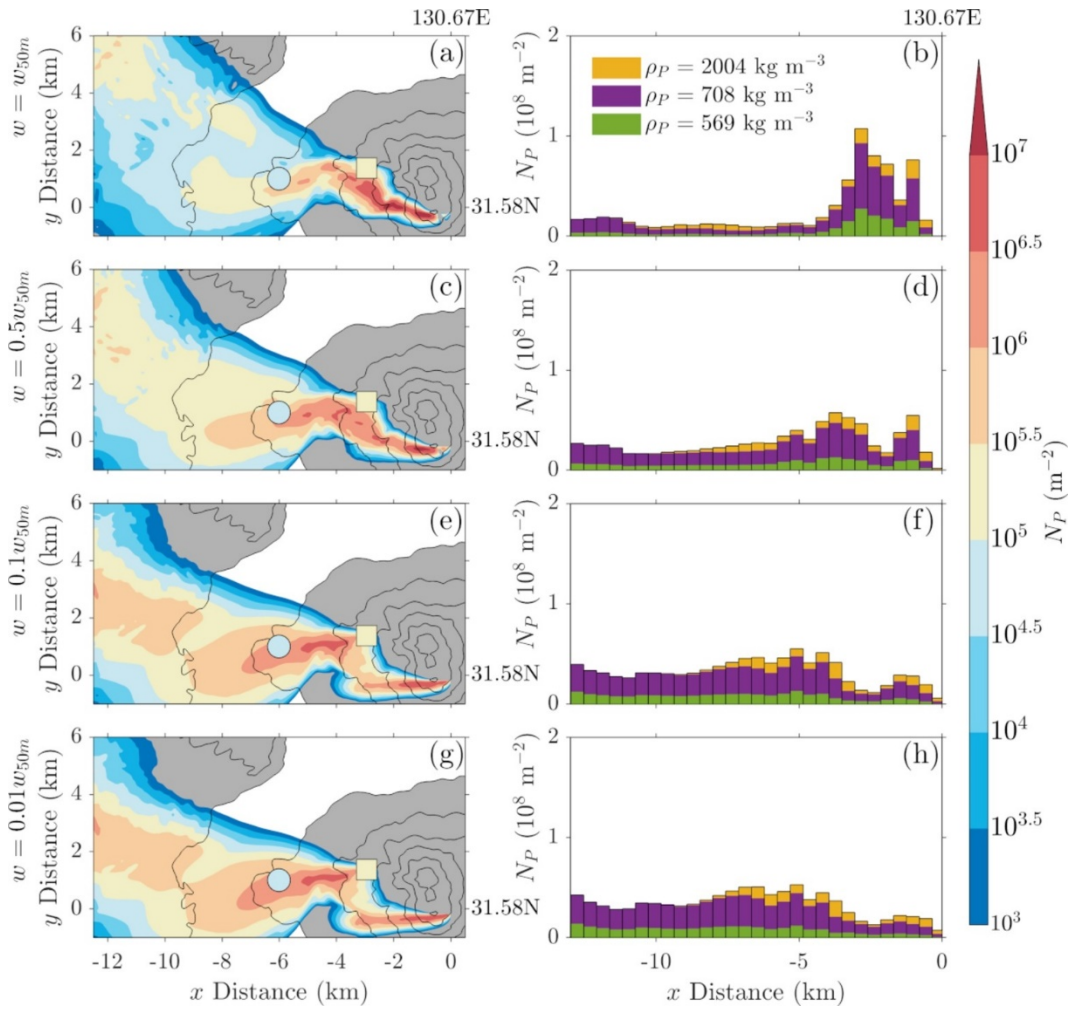


図 72 FALL3D による数値シミュレーションで得られた降灰量の分布 (左列) および南北方向に積算した降灰量の東西分布 (右列)。火山灰の降下速度に及ぼす鉛直速度のスケールパラメータを変化させた 4 通りのケースの結果を示す。(a) (b) スケールパラメータが 1 の場合、(c) (d) スケールパラメータが 0.5 の場合、(e) (f) スケールパラメータが 0.1 の場合、(g) (h) スケールパラメータが 0.01 の場合。左列図中の四角印はディストロメータの設置点、丸印は桜島火山観測所の位置を示す。右列では、異なる粒子密度を仮定した場合の結果を示す。

c) ラージエディシミュレーションによる火山周囲の気流性状

火山周辺の気流をさらに高精細化させるため、WRF から得られる気象場を境界条件とし、地形の凹凸、地表面の植生や構造物など気流を乱す粗度の影響を考慮して、非定常な乱流場の計算を行うことのできるキャノピーモデルを用いたラージエディシミュレーションを用いて、噴火時の火山周囲の気流性状を明らかにした。

i) 計算手法の開発

火山周辺の気流をさらに高精細化させるため、非定常な乱流場の計算を行うことのできるラージエディシミュレーションを用いた気流解析手法を開発した。ここで開発した手法は、以下の機能を有する。

- ・気象場の影響を取り込むことができるように、WRF から得られる気象場を境界条件として用いることができる。
- ・地形の凹凸を取り込むことができるように曲線座標系に基づく計算格子を用いることができる。
- ・キャノピーモデルを用い、地表面の植生や構造物など気流を乱す粗度の影響を取り込むことができる。

構築した計算手法の概要を表 14 にまとめる。

表14 開発した計算手法の概要

<p>* RIAM-COMPACT数値モデル 1) を改変</p> <ul style="list-style-type: none">・数値計算手法：有限差分法・乱流モデル：Large-Eddy Simulation(LES)・流れの支配方程式：フィルタ操作を施された非圧縮流体の連続の式と、ブシネスク近似に基づいたナビエ・ストークス方程式、および、エネルギー方程式(温度方程式)・計算アルゴリズム：部分段階法 2) に準じる・時間進行法：オイラー陽解法・圧力に関するポアソン方程式：SOR法・空間項の離散化：2次精度中心差分、ただし、対流項：補間法3)に基づいた3次精度風上差分。3次精度風上差分の数値拡散項の重みは河村-桑原スキームタイプ4)の$\alpha=3.0$に対して$\alpha=0.5$・LESのSGSモデル：渦粘性近似モデル5) <p>1) Uchida, T. and Takakuwa, S., Large-Eddy Simulation-Based Assessment of the Risk of Wind Turbine Failures Due to Terrain-Induced Turbulence over a Wind Farm in Complex Terrain, <i>Energies</i>, 12(10), 1925,2019. 2) Kim, J. and Moin, P., Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations, <i>J.Comput. Phys.</i>, Vol.59, pp.308-323, 1985. 3) 梶島岳夫, 乱流の数値シミュレーション改訂版, 養賢堂, 2014. 4) Kawamura, T., Takami, H. and Kuwahara, K., Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, <i>Fluid Dyn. Res.</i>, Vol.1, pp.145-162, 1986. 5) Smagorinsky J., General Circulation Experiments with the Primitive Equations: I. The Basic Equations., <i>Mon. Weather Rev.</i>, Vol.91, pp.99-164,1963.</p>
--

数値的に再現した自然風の持つ乱れを再現した変動風速場を、桜島付近を再現した計算領域の境界条件として与えて計算を行い、地形および地面粗度による乱流場が再現できることを確認した。(図 73)。

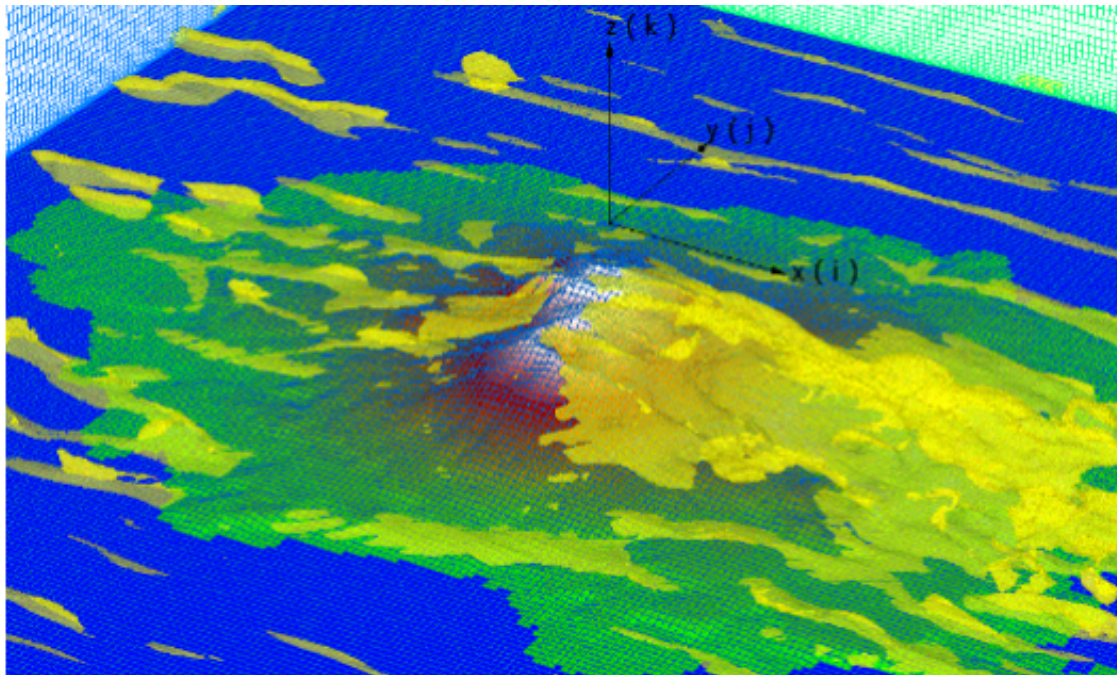


図 73 自然風のもつ乱れを再現した流入風を用いた桜島周囲の気流の再現計算

ii) 大気安定度による噴煙の変化

開発した計算手法を用いて、噴火時の噴煙の移流・拡散状況を検討した。現実の噴煙の移流・拡散状況は、気象状態に左右され変化する。特に、大気の安定度による変化が大きいため、その影響を数値計算で再現することを試みた。図 74～76 は大気の安定度を変えて、桜島の地形に適用した例である。

その結果、構築した計算手法により、大気の安定度の違いにより現実に生じる形状の違いに対応した噴煙の移流・拡散性状の違いを再現することができた。

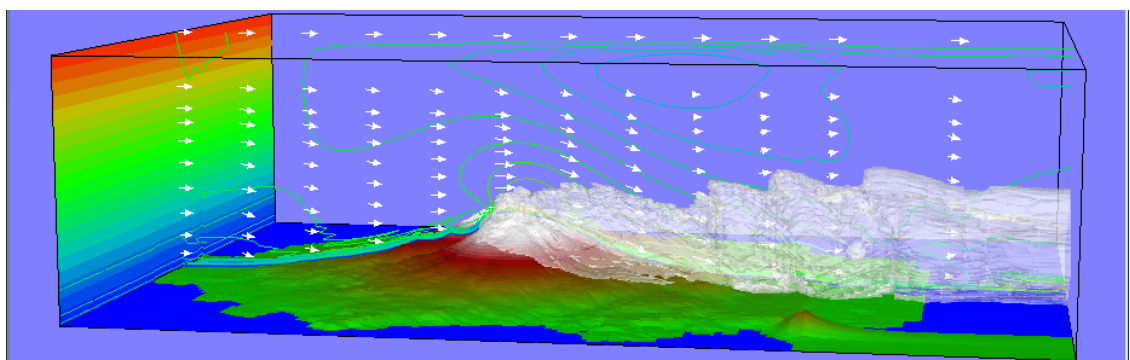


図 74 周囲の大気が安定な場合の噴煙の移流・拡散状況。流入：風速 0.5m/s (1/7 勾配、乱れなし)、温度 (+勾配: -5K~0K)、噴流：温度+20K、0.2m/s。

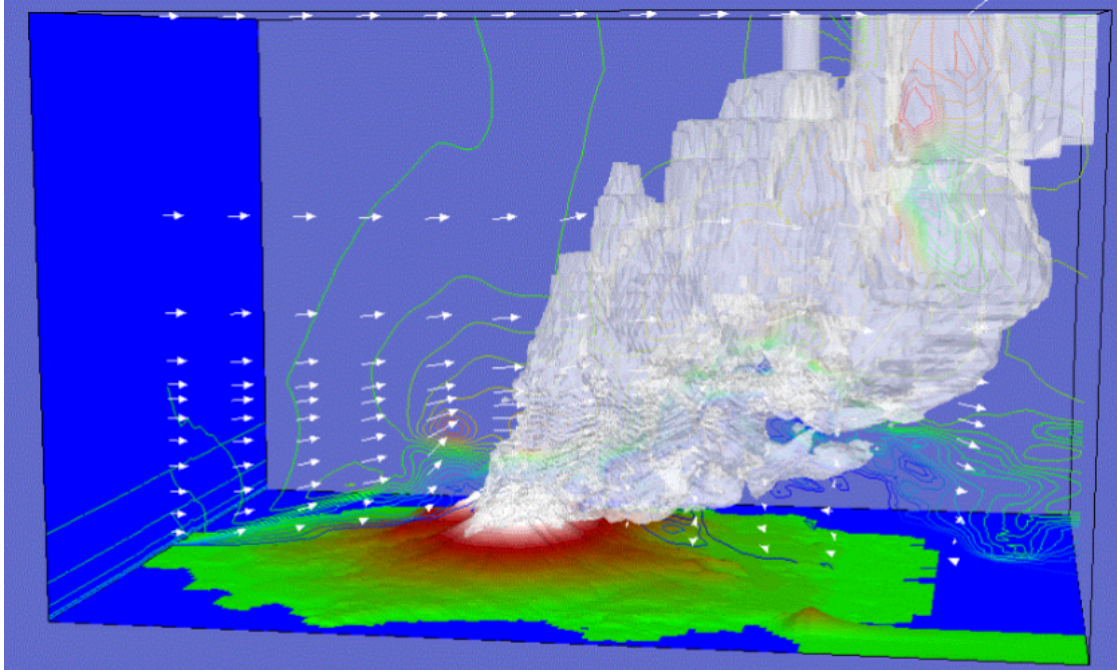


図 75 周囲の大気が中立の場合の噴煙の移流・拡散状況。流入：風速 1m/s (1/7 勾配、乱れなし)、温度 (勾配 0) 噴流：温度+20K、0.1m/s。

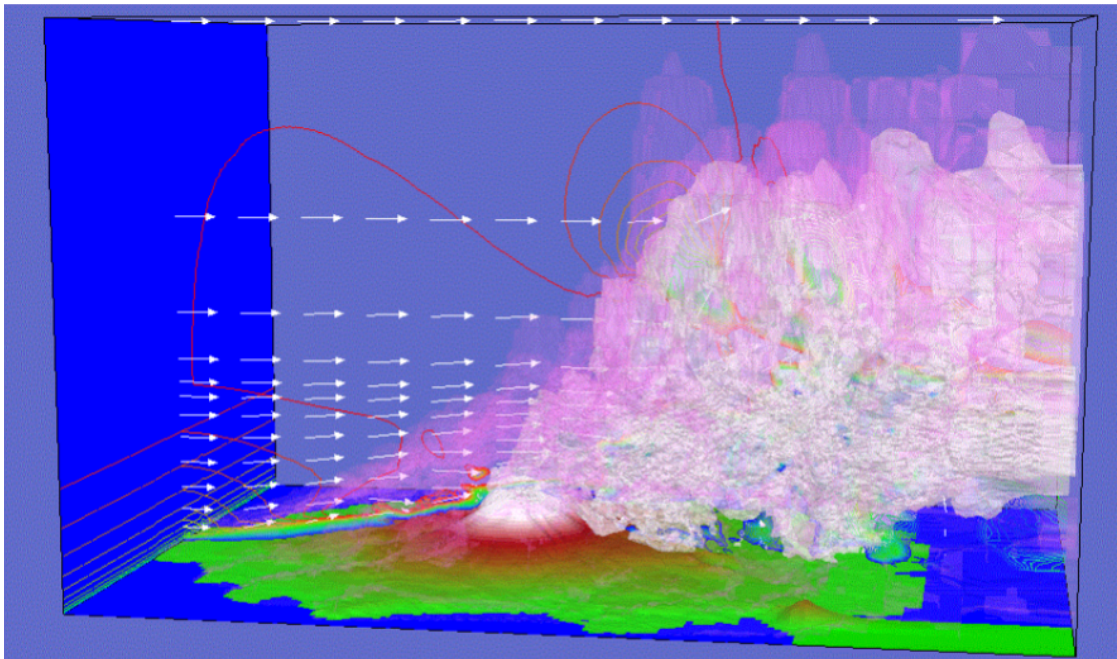


図 76 周囲の大気が不安定な場合の噴煙の移流・拡散状況。流入：風速 1m/s (1/7 勾配、乱れなし)、温度 (勾配 0) 噴流：温度+20K、0.1m/s。白色の等値面は火山灰の分布を、薄桃色の等値面は温度の分布を表す。

2) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発

オンライン化を図るために、データの集約システムを開発した。オンラインで集約したデータは地震及び地盤変動データから計算される噴出率、レーダー観測により得られる火口直上の反射強度、地上風速データ、ディストロメータ観測による火山灰の粒径・落下速度毎の粒子数である。また、気象モデルの気象場をWRFにより高分解能化した気象場データは随時、データベースに追加した。ディストロメータ観測データを課題AのJVDNへ自動送信した。また、気象モデルや地上気象観測から得られる現在の気象場に類似した気象場に対応する高分解能風速場をデータベースから抽出する手法を開発した。さらに、火山灰の移流拡散モデルを噴出率の連続データに対応できるように改良を検討した。

a) 噴出率の時系列

噴出率は、式(1)を用いて火山性微動の振幅と地盤変動を励起する圧力源の体積変化から求めた。この式は、月ごとの降下火山灰量から算出した火山灰放出量と1か月のスペクトルおよび圧力源の体積変化量に適用されたものであるが、個々の爆発についても適用可能なことが示されている(Iguchi, 2016)。ここでは、この式を1分毎の2~3Hz帯域のスペクトルと圧力源の体積変化量に適用し、1分毎の火山灰放出量として、連続的に算出した。なお、パラメータ α 、 β 、 γ は1か月の値から1分の値に換算している。地震動については、桜島島外において発生する構造的な地震や火山構造的な地震(A型地震)は火山灰放出に寄与しないので、これらの地震を検知した場合は、 αA の項を除去した。また、圧力源の体積変化(V)が火山灰放出に関与するとする βV の項については、 V を火口方向のひずみと直交方向のひずみの比から求めているため、噴火開始から両者の比が-2~0の間に入る時間帯のみについて算出している。

このようにして求めた1分毎の火山灰噴出率を図77に示した。対象とした期間は噴火活動が南岳に回帰した2017年11月以降、2022年3月までである。最も、噴出率が大きかったのは、2017年11月13日22:07に開始した爆発で、22:08に18千トン/分に達した。2018年6月16日7:19の爆発では噴出率が16千トン/分、7:20でも14千トン/分を維持した。2018年11月14日0:42の爆発でも噴出率が14千トン/分であった。2019年では9月以降、2020年6月まで噴出率が高い状態が続いた。これは、噴火活動が活発であったことを反映している。特に、2019年11月上旬は噴出率が高く、噴出率が16千トン/分に達した11月6日23:01の爆発を含め、4回、噴出率が10千トン/分を超えた。これらの爆発では、噴煙高度が4000m以上に達しており(鹿児島地方気象台の観測では2017年11月13日22:07の爆発は雲入りとなっているが、レーダー観測から4200m程度と判定できる)、噴出率と噴煙高度は密接な関係があることがわかる。噴煙高度が5500mに達した11月8日17:24の爆発でも噴出率は6千トン/分と多い。

噴火活動が活発な状態は、2020年6月まで続いたが、それ以降、噴出率は小さく、概ね5千トン/分未満である。特に、2020年6月中旬から11月、2021年5月中旬以降は、噴出率が0に近い。

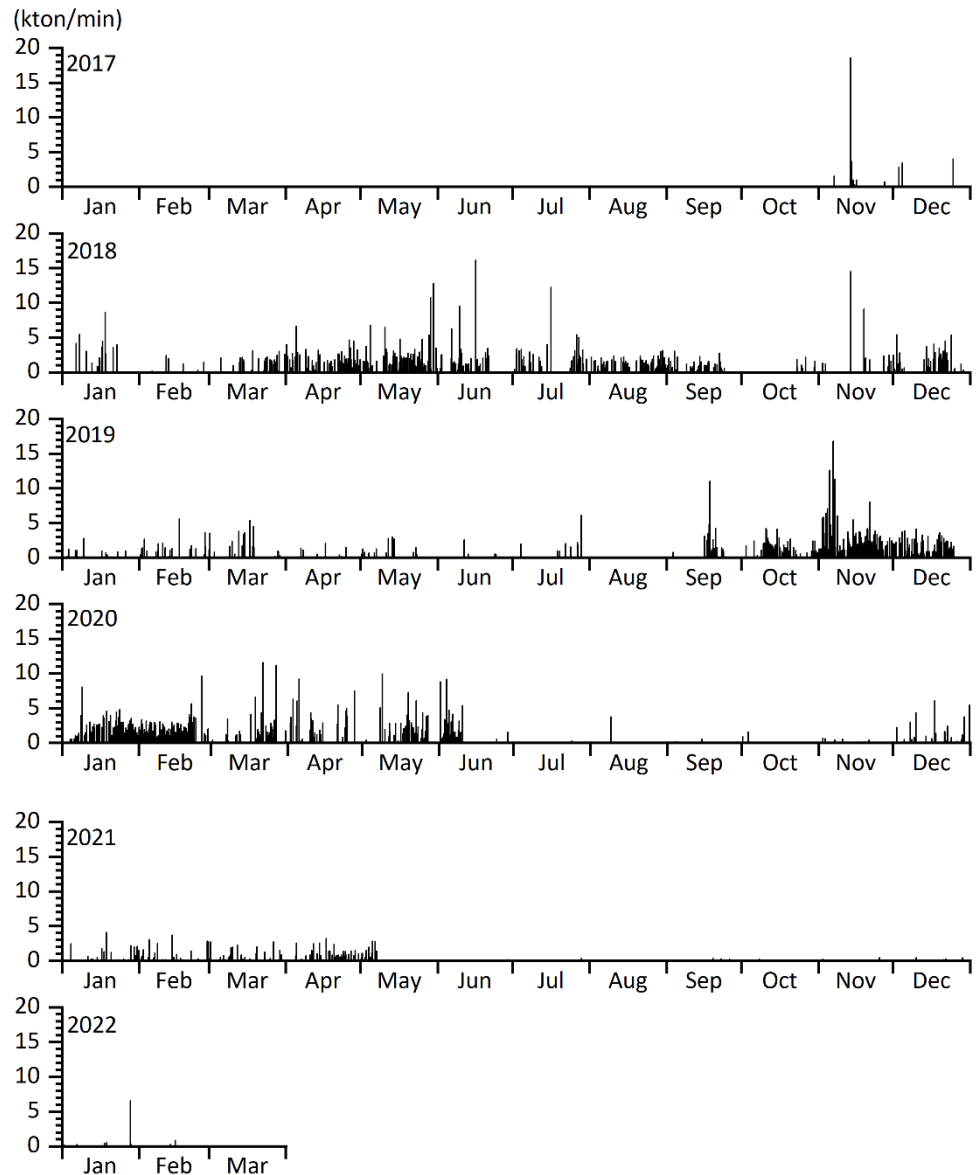


図 77 噴出率の時系列。1 分毎にプロットした。

b) 風速場の時系列

2020 年までの期間について、高解像度風速場のデータベース (NetCDF) を作成した。

i) 高解像度風速場の計算

火山近傍の風速場は、地形の影響を強く受けることが知られている。Poulidis et al., (2017) は、領域気象モデル WRF Version 4 (Skamarock et al., 2019) を用いて気象モデルから得られる風速場を高精細化し、風下側では下降流が卓越し、風速が 50% 増加することを示した。さらに、降灰量予測の影響を見積もった。そこで、火山灰移流拡散の連続シミュレーションにおいても WRF により高精細化された気象場を用いる。

WRF モデルの計算領域の設定を図 78 に示す。一番外側の領域を Domain 1 とし、内側に Domain 2 をネストさせて領域設定した。Domain 1 と 2 の水平格子幅は、それぞれ 3150 m および 1050 m とし、これらの計算領域での乱流混合のパラメタリゼーションには境界層スキームを用いた。また、鉛直方向には、格子間隔を下層ほど細かくし、上層ほど粗くするような伸縮型の鉛直レベルを設定した。WRF による領域シミュレーションで必要とされる気象場の初期条件・境界条件は、ヨーロッパ中期気象予報センター (ECMWF) の解析値 ERA5 を用いた。

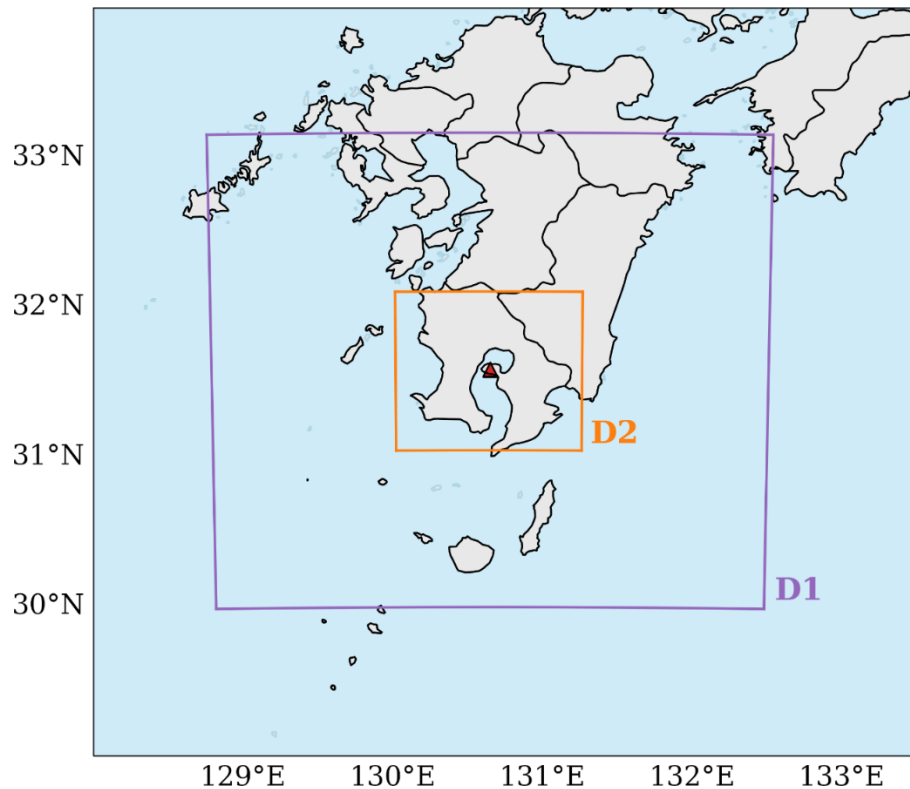


図 78 WRF モデルの計算領域

ii) 高解像度風速場の事例

WRF を用いた高分解能の風速場の計算には時間を要するため、噴出率や噴煙高度のように逐次得ることができない、そこで、過去の気象モデルに遡り、2018 年と 2019 年について高分解能風速場データベースを作成した。風速場の分解能は 100m である。計算された高分解能風速場データベースは膨大であるので、ここではその一例を示す。

図 79 は南岳の南東 0.5km、海拔高度 1000m (南岳山頂とほぼ同じ高度) における 2019 年 9 月～12 月の風速場である。水平風は概ね 20m/s 以下であるが、9 月下旬には風速 40m/s を超えた。このときは、はじめ上昇風、その後、下降風が強くなった。鉛直風についてみてみると下降風が卓越していることがわかる。

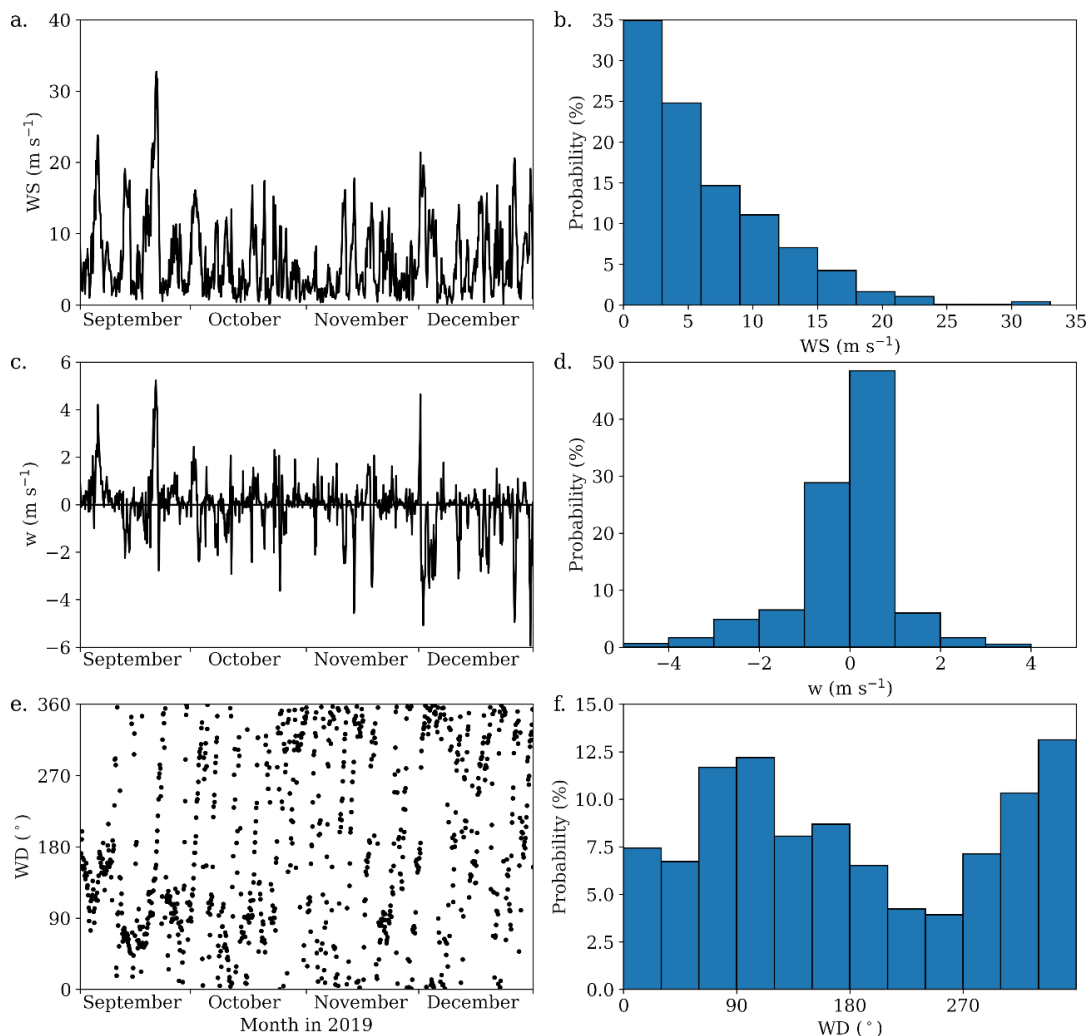


図 79 南岳の南東 0.5km、高度 1000m 付近における 2019 年 9 月～12 月の風速場。左列は上から水平風、鉛直風、風向である。右列はそれらの確率分布を示す。

c) 火山灰移流・拡散シミュレータの連続化の設計検討

火山灰の拡散・降下については、噴出量、噴煙の高さ、高さに応じた粒度分布を持つ柱状モデル、終末速度など、多くのシミュレーションが行われてきた。これらのパラメータのうち、噴出量は降下火山灰量を決定づける最も重要なパラメータであるにもかかわらず、総噴出量と噴火の継続時間のみ与えられ、噴出率の時間変化は考慮されていない。これは、噴火の過程を噴出率の視点から詳細に把握することが困難であったことによる。短時間で終息するブルカノ式噴火では噴出量を impulsive に与えることにより、降下火山灰量を予測することができる。一方、数時間から日単位で長時間続く噴火やブルカノ式噴火が頻発する場合は、火山学の課題として噴出率の時間変化を、また、気象学の課題として噴火継続中における風向、風速の変化を考慮する必要がある。ここでは、長時間継続する噴火にも対応できるように、連続的にデータの得られる地震計およびひずみ計の記録を入力条件とし、火山灰拡散シミュレータを連続的に稼働させて単位時間当たりの降下火山灰量および積算量を常時評価することのできるシミュレーションシステム設計の検討を行う。

i) 連続化のための基本的な考え方

火山灰の移流・拡散シミュレータは様々なパラメータを含むが、降下火山灰量の空間分布に最も大きな影響を与えるのは、火山灰の噴出量と風速場である。準リアルタイムで連続的にシミュレータを稼働させるためには、火山灰の噴出量と風速場を連続的に与え続ける必要がある。風は大気の循環であるので、元々、風向・風速は連続量であるが、火山灰量はこれまで噴火イベントごとの量として扱われてきた。これを単位時間当たりの噴出量の時間関数に拡張する。桜島火山の昭和火口における火山灰噴出量は地震観測から得られる火山性微動振幅と地盤変動観測から見積もられる圧力源の体積変化量の線形結合により近似される (Iguchi, 2016)。観測手法が robust な火山性微動および地盤変動データを用いることにより、連続的に噴出率を評価できる。風速場については世界の気象機関から公開されている予測値を用いればよい。ただし、火山近傍における風速場は、地形の影響により複雑なので、高精細化が必要となる。

火山灰の移流拡散の連続化シミュレーションシステムの概要を図 80 に示す。このシステムでは、移流拡散シミュレーションを一定間隔で繰り返す。そのために、噴出率の時間関数をシミュレーションの繰り返し時間間隔で離散化した値を噴出率として扱い、継続時間はシミュレーションの繰り返し時間間隔とする。個々のシミュレーションから算出される降灰量を位置毎に加算して、降灰量積算値の空間分布を求める。

火山灰噴出率の時間関数は、有村観測坑道における地震動と火口方向および直交方向のひずみ変化から式 (1) により計算される 1 分ごとの火山灰放出量である。火山灰放出量から噴煙高度を経験式により算出し、火口直上から噴煙頂部の高度まで火山灰を配置する。噴煙の拡散効果を考慮しつつ、風速場の予測値をもとに移流と火山灰粒子の重力降下を計算し、地上降灰量を求める。

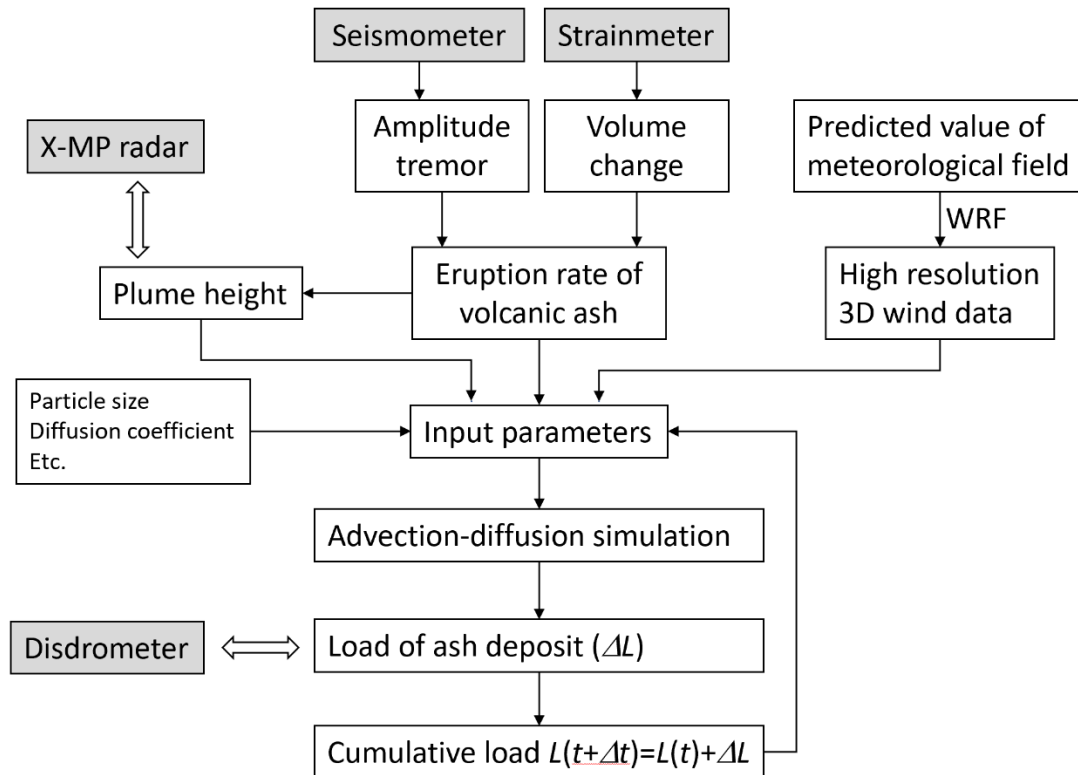


図 80 火山灰移流・拡散シミュレータの連続化のためのプロセスとデータのフロー

ii) 噴煙高度および降灰量の実測値との検証

シミュレーションに用いた噴煙高度をレーダー観測による噴煙高度と照合する。レーダーから得られる噴煙の反射強度は大気中における火山灰濃度の分布を表している (Maki et al., 2016)。反射強度分布は火山灰濃度分布で、火口から大気に注入される火山灰の噴出率そのものではないが、火口直上に形成された噴煙柱をシミュレータの初期値とすれば、噴出率から計算される噴煙高度は、レーダーにより得られる反射強度の強い部分の最高高度を用いて検証可能である。シミュレーションにより得られた地上降灰量は、ディストロメータによる火山灰粒子のカウントと照合できる。ディストロメータは粒径・落下速度クラスごとの火山灰粒子数を観測でき、これらのデータから降下火山灰重量を見積もることができる (Takishita et al., 2021)。ディストロメータは降灰量の連続観測を可能とするので、シミュレーションにより得られた降灰予測値の検証に用いることができる。桜島においては 21 台のディストロメータが稼働しており (図 22)、あらゆる火山灰の流向に対して対応できる。

d) 火山灰移流・拡散シミュレータの連続化のためのプロセス繰返し時間間隔の検討

移流・拡散シミュレーションは、風速場にしがった火山灰粒子の移動、拡散係数で表現される噴煙の拡散、重力による火山灰粒子の落下を考慮したものであり、ラグランジュ的手法とオイラー的手法に大別される。ラグランジュ的手法は火山灰粒子の移動を風速場と重力場に沿って追跡したものであり、拡散係数は、粒子の移動のあい

まいさとして表現される。火山灰放出率は、火山灰粒子の数もしくは火山灰粒子 1 個当たりの重量により表現され、降下火山灰量は地表に到達した火山灰粒子の数もしくは火山灰粒子 1 個当たりの重量密度により表現される。一方、オイラー的な手法では、火山灰濃度を属性として持つグリッドが三次元空間に配置され、風速場と重力場を反映したグリッド間の火山灰のフラックスを評価する。火山灰放出率は、噴煙に相当するグリッドにおける濃度の増加量であり、降灰量は地表に相当するグリッドにおける濃度の増加量である。いずれの場合も、微小な時間ごとの逐次計算を繰り返す事により、三次元的に不均質で時間変化する風速場を反映したシミュレーションが可能であり、これまでに多くの実績がある。ここでは、汎用ワークステーションを用いて、ラグランジュ的手法とオイラー的手法について、火山灰移流・拡散シミュレータのプロセス所用時間を調べ、連続化のための技術的な検討を行った。

使用したワークステーションの仕様は以下のとおりである。Windows10 上で仮想マシンを立ち上げ、以下の構成とした。

表 14 ワークステーションの仕様

CPU	Intel (R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz この内、プロセッサ 4 個を仮想マシンに割り当て
メモリ	8GB
HDD	64GB (仮想環境なので足りなければ後で追加可能)
OS	AlmaLinux 8.4

i) ラグランジュ的手法

ラグランジュ的気手法としては、PUFF (Tanaka and Yamamoto, 2002) を用いて、試験を行った。

シミュレーションは、噴火日時及び噴煙高度は固定とし、粒子数を 10000、5000、1000、500、100 とした時の計算にかかる時間がどの程度かかるかを調査した。元々のプログラムでは計算後の画像生成に大部分の時間が費やされる事がわかっていたため、このシミュレーションでは画像は降灰マップ(fall.gif)のみとし、さらに計算部分と分けて調査を行った。

この際、粒子数を 10000 とした所、プログラムが異常終了した。調査してみると、最大粒子数を 5000 としてプログラムされていたため、この制限を 50000 としている。また、時間分解能は 5 分であり、粒子を追跡する時間は 6 時間に固定されている。

プロセスの所要時間を表 15 に示す。シェルにて `date` を用いて計測しているため 1 秒以下は誤差範囲であり、上記条件ではどれでもほぼ差が見られなかった。

また、この計算時間の内の大半は、風速場の計算に費やされており、粒子の追跡計算はほぼ一瞬で終わっている事から、粒子数を多少増やした所で処理時間にはほぼ影響を及ぼさないと考えられる。なお、試験的に粒子数を 50000 としてみたが、

結果は同じであった。つまり、PUFF での計算時間は粒子数に依存するが、10000 個程度では大差がないという結果が得られた。

表 15 粒子数と計算所要時間

粒子数	計算時間 (秒)	画像生成時間 (秒)
10000	6	1
5000	7	0
1000	6	1
500	6	0
100	7	0

※計算時間はシェルの date を用いて計測したので、秒単位となっている。

PUFF による処理時間は粒子数のみに依存する。火山灰量は粒子 1 個当たりの重量に割りあてるため、大規模噴火の場合、粒子 1 個当たりの重量を重くすればよい。また、大規模噴火で噴煙高度が高くても、粒子の初期座標を高い高度に設定するだけである。よほど多量の粒子数を設定しない限り、処理はとても軽い。これは、地形を考慮しない風速場のデータのみを取り込んで計算しているためである。

以下、PUFF を連続化降灰量予測シミュレーションと実行するために、考慮すべき点及び追加機能を列記する。

①火山灰粒子の地上への到達

現行の PUFF は高度 0m 以下になった粒子を降灰量に換算するが、地形を考慮した降灰判定に変更する必要がある。また、地上に到達した時刻をタイムスタンプとして付加する必要がある。

②風速場データ

現行の PUFF は、気象庁が公開する GPV データを元に風速場を内挿して計算しているが、高解像度風速場は netCDF 形式で作成したので、風速場データ Import 形式を netCDF に対応する必要がある。

③粒子数、降灰量

現行の PUFF は、粒子 1 個当たりの重量を固定し、粒子数を変えることにより火山灰噴出率を表現している。噴出率が小さい場合、粒子数が 100 個以下となり、本来降灰があるべき地表に粒子が到達しないこともあり得る。シミュレーションされた降灰量はディストロメータで観測される降灰量により、評価する計画であるので、噴出率が小さい噴火でもディストロメータ観測点付近に数個程度の粒子が落下するような総粒子数の設定が必要である。このためには、噴出率に応じて、総粒子数を変える工夫が必要である。

④時間分解能

現行の PUFF のタイムステップは 5 分に固定されており、各種プログラムに埋め込まれている。本研究の実験結果から、タイムステップを 1 分にして、時間分解能を向上させることも可能である。

⑤シミュレーションによる降灰量データ

現行の PUFF では、最新の結果のみデータとして保存される。連続化シミュレータでは、個々のシミュレーションから得られる降灰量の積算値を扱うので、タイムステップごとの降灰量を保存しておく必要がある。

ii) オイラー的手法

オイラー的な手法では、火山灰濃度を属性として持つグリッドが三次元空間に配置され、風速場と重力場を反映したグリッド間の火山灰のフラックスを評価する。火山灰放出率は、噴煙に相当するグリッドにおける濃度の増加量であり、降灰量は地表に相当するグリッドにおける濃度の増加量である。微小な時間ごとの逐次計算を繰り返すことにより、三次元的に不均質で時間変化する風速場を反映したシミュレーションが可能である。

ここでは Fall3D を試験した。Fall3D は、GitLab にて公開されているプログラムで、現在の最新バージョンは 8.1.1 (Folch et al., 2020) である。

<https://gitlab.com/fall3d-distribution>

ここから、fall3d-8.1.1.tar.gz をダウンロードし、構築したプログラムを使用してシミュレーションを行った。

Fall3D は、netCDF 形式の気象データと設定ファイル(.inp)により動作する。設定ファイルの項目の多くはデフォルト値を用いた。シミュレーションは、噴火日時を固定とし、噴煙高度とグリッドサイズを変えることにより、計算所要時間を調べた。シミュレーションのための噴煙高度とグリッドサイズの組合せによるケースは表 16 に示すとおりである。

表 16 ケースごとの噴煙高度とグリッドサイズ

ケース	グリッドサイズ X, Y, Z (km)	グリッド分解能 (m)	グリッド数	噴煙高度 (m)
1	36×36×10	水平 1500m 鉛直 500m	11,520	8000
2	36×36×10	水平 1500m 鉛直 500m	11,520	3500
3	18×18×5	水平 600m 鉛直 200m	22,500	3500
4	18×18×5	水平 300m 鉛直 100m	180,000	3500

シミュレーションする時間長は PUFF に合わせて 6 時間とした。また、時間分解能 3 分とした。地震動および地盤変動から算出される火山灰放出率とディストロメータの記録間隔は 1 分であるので、シミュレーションの時間分解能も 1 分にした

いが、Fall3D は時間分解能を時間単位でしか指定できない。1 分は 0.016666... となり割り切れないため、計算上の誤差となり、指定することが出来ない。そこで、ここでは時間分解能 3 分 (0.05 時間) とした。

Fall3D は並列処理が可能な設計となっており、多コアの CPU であれば複数スレッドを同時に走らせることで、時間の短縮が可能となっている。今回の仮想環境 (表 14) では、4 つのコアを割り当てているので、コア数 1~4 の並列計算も試みる。これにより、どの程度の CPU が必要であるかを想定する事が出来る。

シミュレーションに使用する気象データは、本研究で作成した netCDF 形式の高解像度気象データを用いた。この気象データは yyyy-mm-dd_HHMMSS.nc というファイル名で 3 時間毎に生成されているが、Fall3D では、気象データを 1 つのファイルとして与える必要があるため、6 時間のシミュレーションを行うため、ncrcat コマンドを用いて 3 つのファイルを 1 つに結合した。

Fall3D では以下の 4 つのプロセスがある。

表 17 Fall3D を構成する 4 つのプロセス

プロセス	内容
SetTgsd	カテゴリ粒子または放射性核種の種の粒子総粒子サイズ分布 (TGSD) を生成
SetDbs	気象モデルグリッドから FALL3D 計算領域に気象変数を補間
SetSrc	様々な種の放出源項を生成します。また、アприオリ粒子凝集と TGSD カットオフを実行
Fall3d	FALL3D ソルバーを実行
All	上記4つを順次実行

シミュレーションでは、All を用いてまとめて解析を行うが、各工程での時間がわかると、どこに最も時間がかかっているのかを判別出来るので、これらの工程毎の時間もわかるようにしている。

SetDbs により気象データを読み込んで内挿等を行う過程で気象データを読み込むが、最初の 1 回目のみ 1 分程余分に時間がかかる。これは Linux システムのファイルキャッシュが働いているためであり、この影響を排除するためには毎回再起動する必要性が生じる。Fall3D 用の結合気象データを作成した後は、2 回目以降と同様の時間となることが実験により判明した。連続化運用時にはバックグラウンドで気象データ結合プロセスを実行すればいいので、解析時には 2 回目以降と同様の時間がかかる事になる。そこで、ここでは、1 回目を無視し、2 回目以降のシミュレーション結果を示す。

各ケースと CPU 数の条件下のシミュレーションの所要時間を表 18 に示す。

表 18 各ケースと CPU 数の条件下のシミュレーションの所要時間

ケース	CPU 数	解析時間 (s)	SetTgsd (s)	SetDbs (s)	SetSrc (s)	Fall3d (s)	時間 比率
1	1	27	0	2	1	24	1.00
	2	19	0	3	1	15	0.70
	3	16	0	3	1	12	0.59
	4	14	1	3	1	9	0.51
2	1	28	1	2	1	24	1.00
	2	19	0	3	1	15	0.67
	3	17	1	3	1	12	0.60
	4	13	0	4	0	9	0.46
3	1	119	2	2	1	116	1.00
	2	73	0	3	1	69	0.61
	3	55	0	3	1	51	0.46
	4	48	1	3	1	43	0.40
4	1	3743	0	4	1	3738	1.00
	2	2160	0	5	1	2154	0.57
	3	1553	1	5	0	1547	0.41
	4	1225	0	5	1	1219	0.32

※時間比率は、CPU 数 1 に対する時間比率である。

以上の結果から CPU 数を増やすと確実に効果があることがわかる。計算を並列化させても、最終的にはまとめて 1 つにしてファイルに出力するという工程があるので、ベースとなる時間以下にはならないこともあり、直線的に効率が上がるわけではないが、CPU 数が多いのが有効であることは確かである。

また、グリッド数が多いほど時間がかかることもわかる。パターン 1 と 2 はグリッド数が同じであるため、解析時間も同じ事からも証明される。ただし、グリッド数の増加以上に解析時間が増えていることもわかる。

CPU 数 4 の場合のグリッド数と解析時間を表 19 に示す。

表 19 グリッド数と解析時間の関係

ケース	グリッド数	解析時間 (s)	グリッド数比率	解析時間比率
1, 2	11, 520	13	1.00	1.00
3	22, 500	48	1.85	3.69
4	180, 000	1225	15.63	94.23

ケース 4 のグリッド数は、ケース 1, 2 の約 15 倍であるが、解析時間は 94 倍かかっている。この比較から、単純にグリッド数の増加だけが解析時間増加の原因では

ないことがわかる。それ以外の要因として考えられるのは、出力ファイル生成に要する時間である。

そこで、それぞれのケースについて結果ファイル (*.res.nc) のサイズを比較して、表 20 に示す。この比較では、ファイルサイズの増加は、ほぼグリッドサイズの増加と一致している事がわかる。しかし約 90Mbyte の結果ファイルを出力するのに何分もかかるとは考え難く、解析時間長に関わっている事がわかった。

表 20 ケース 4 における解析対象時間長とプロセス時間の関係

解析対象時間長 (時間)	Fall3dプロセス時間 (s)	解析対象時間当たりプロセス時間 (s)	出力レコード数	総出力レコード数	1レコード当たりプロセス時間 (s)
1	53	53	20	210	0.252
2	114	54	40	820	0.139
3	312	104	60	1830	0.170
4	532	133	80	3240	0.164
5	833	166	100	5050	0.164
6	1219	203	120	7260	0.167

結果ファイルは1解析毎(3分)毎に出力されるが、出力形式が netCDF 形式であるため、毎回全て書き直されている。1回目は1レコード、2回目は2レコードを書き出すが、1時間では、1~20の和の回数レコードを出力する。すなわち、nレコードは、 $n / 2 * (n + 1)$ レコードを出力する。これを表 20 の総出力レコード数に示した。Fall3d のプロセス時間と、総レコード数は比例関係にあり、Fall3d のプロセス時間を総レコード数で割った値(表 20 の 1レコード当たりプロセス時間)はおよそ 0.16s となる。本試験では、CPU 数を 4 までしか設定していないのでこれ以上の高速化は見込めない。ケース 4 は 3 分毎の繰り返し計算を実行できない。

PUFF と比較した場合、シミュレーション時間等は圧倒的に長くかかってしまうが、降灰量にも地形が考慮されており、プログラムの新たに作り込む部分は非常に少なく済みそうである。

iii) 連続化を踏まえた PUFF と Fall3D の比較検討

火山灰粒子濃度をグリッド毎にシミュレートする Fall3D の方が、ディストロメータ観測点における降灰量の検証がやりやすい。また、NetCDF 形式である高解像度気象データをそのままインポートすることもメリットとなる。

一方、Fall3D は、プロセス時間が長いデメリットはある。最近の桜島において発生する小規模噴火であれば、解析対象時間は1時間を見込めば十分であり、大規模噴火では解析対象時間を長くする必要があるが、この場合は、グリッド数を減らし

てよい。解析対象時間とグリッド数をチューニングすることにより、最適な条件を決定できる見込みがある。また、小規模噴火と大規模噴火用の Fall3D を並行して稼働させることもできる。

e) 高精細化気象場の抽出手法検討

本計画で検討する連続化された火山灰拡散シミュレータは、3分おきにシミュレータを起動し解析を行うことを想定している。この時間分解能での時間発展をリアルタイムで計算することのできる風速場は、気象庁の提供する5kmメッシュのMSMデータである。本計画におけるオンラインシステムで予測対象とする、小規模な火山噴火における火山灰の分散は、山岳地形に起因する風速場の影響を大きく受ける。そうした影響を考慮するには、MSMの風速場でも解像度が低い。空間方向の解像度がより高い風速場をリアルタイムで計算するのは困難であるため、あらかじめ用意された高解像度の風速場から、現況に最も近いものを選択して計算に使用するのが適切だと考えた。そこで、MSMデータの比較結果に基づいて、リアルタイムの風速場に最も近い高解像度の風速場をデータベースから選択する方法を検討した。

i) MSMデータから高解像度風速場取得手順

高解像度風速場データは、WRF (Weather Research and Forecasting) モデルのバージョン4 (Skamarock et al., 2019) を使用して計算されている。ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) の再解析データセット (ERA5: 水平分解能 31 km, 鉛直方向 137 層, 時間分解能 1 時間) を初期条件として、高分解能化の計算を行い、鉛直 0.3 km (376×426 点), 時間分解能 20 分, 鉛直方向に 58 層 (地表から海拔 1km までは 50m の格子間隔, 50hPa (海拔約 21km) の領域上端付近では 1km の格子間隔) のデータとなっている。

高解像度風速場を抽出する手順は以下のとおりである。

1. 予測対象時刻における MSM データから、850, 700, 600, 500, 400hPa 面 (それぞれ海拔約 1500, 3000, 4500, 6000, 7500m) での、水平方向に火口近傍 9 地点における東西・南北方向の風速の値を取得し、データ長 90 個のデータセットを用意する。
2. データベースに含まれた参照時刻における同高度・同地点の東西・南北方向の風速の値を取得し、各時刻においてデータ長 90 個のデータセットを用意する。
3. 予測対象時刻と各参照時刻におけるデータセットの RMSE を計算し、RMSE が最小となる参照時刻を求める。
4. 参照時刻における高解像度データを取得し、降灰シミュレーションに代入して予測計算を行う。

ii) 妥当性の検証

この抽出手法の妥当性を評価するために、用意したデータセットを仮想的な参照データベースとリアルタイムデータに分割し、選定を実行した。参照データベースは2018年7月2日12:00から2019年12月30日18:00までの627回の時刻におけるデータで、リアルタイムデータは2018年1月1日9:00から2018年7月2日9:00までの209回の時刻におけるデータである。最小二乗誤差 (RMSE) が 1.3m/s だった、仮想リアルタイムデータと参照データを図 81 に示す。MSM による残差評価により、よく似た WRF データを抽出することができた。得られた最適解の RMSE は、仮想的なリアルタイムデータの 8 割以上において 3m/s 以内となり (図 82)、この手法で、あらかじめ用意された参照データベースから高解像度な風速場を抽出する妥当性が示された。

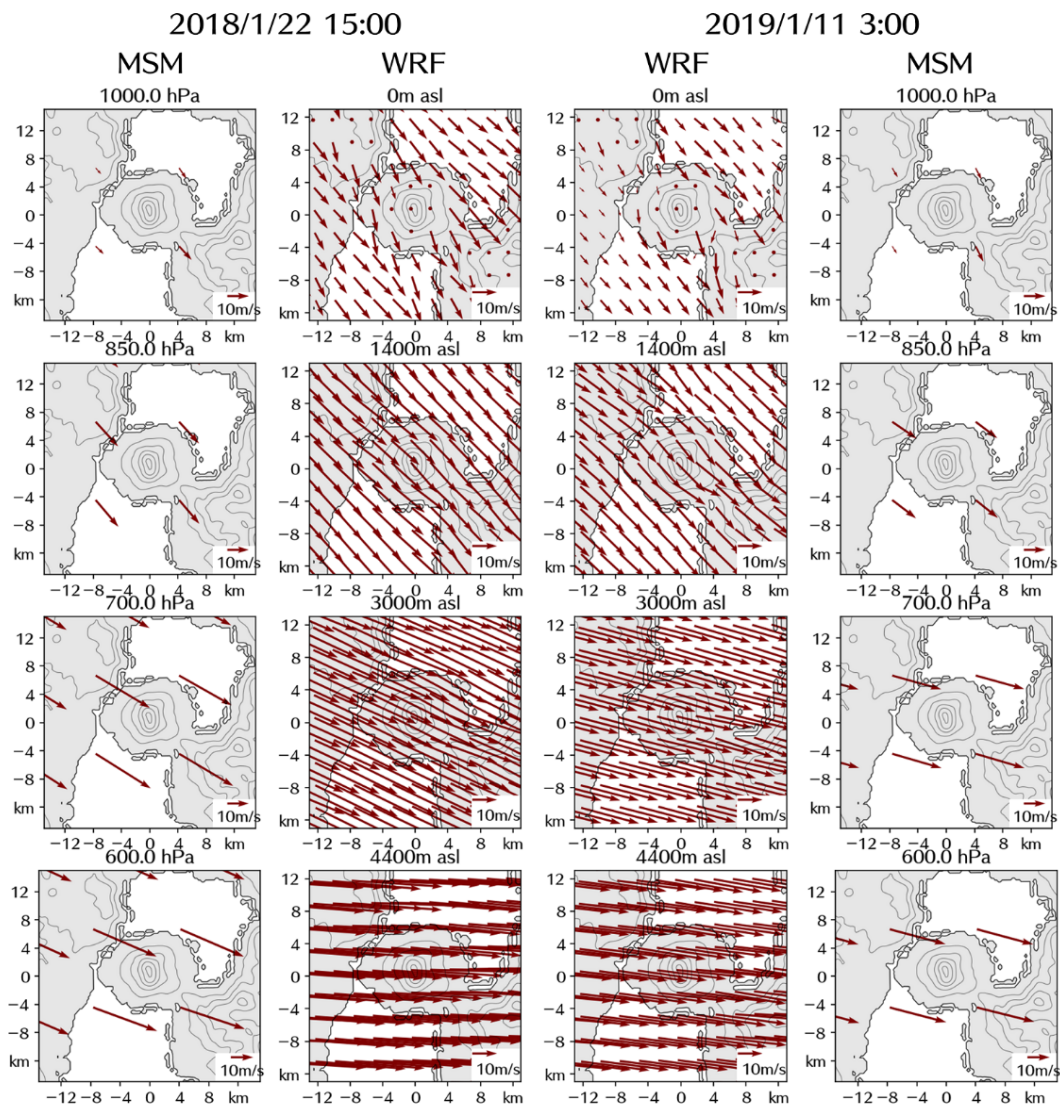


図 81 RMSE が 1.3m/s だった仮想リアルデータと最適参照データとの比較。

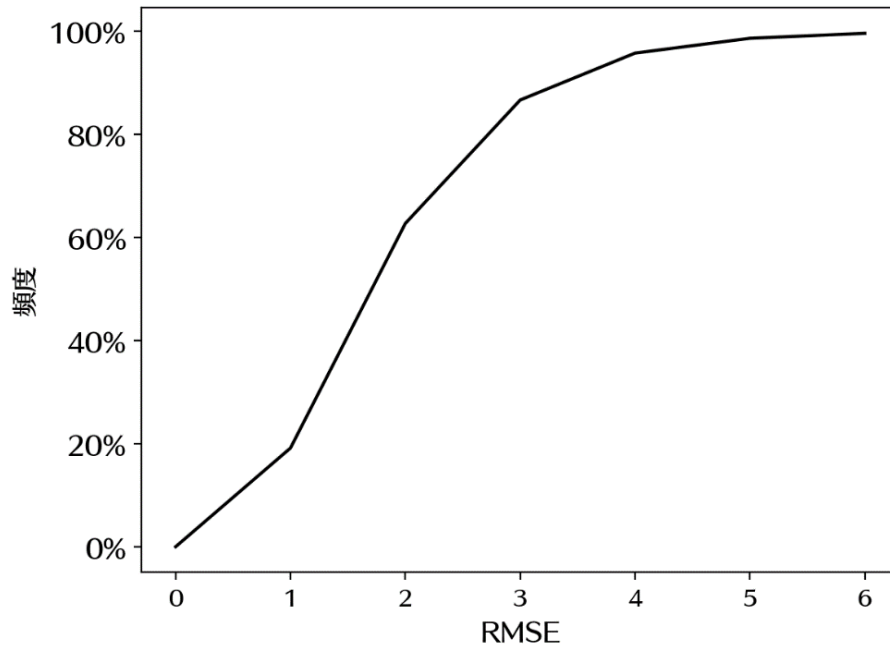


図 82 仮想的なリアルタイムデータに対して求められた最適参照データの RMSE。

(c) 結論

火山灰拡散シミュレーションの連続化のための技術検討により、令和 4 年度にデータのオンライン化をベースとするシミュレーターの連続化の実装の目途が立った。これまで、実施してきたリモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発、火山灰拡散予測の高速化技術開発、火山灰拡散予測の高精度化技術開発は令和 3 年度の研究により、さらに高度化され、その一部の成果は連続化シミュレータの設定条件とシミュレーション結果の検証に組み込むことができる。

(d) 引用文献

- 1) Shimizu A., Iguchi M., Nakamichi H. (2021) Seasonal Variations of Volcanic Ash and Aerosol Emissions around Sakurajima Detected by Two Lidars. *Atmosphere*, 12 (3), 326.
- 2) Shimizu A., Sugimoto N., Matsui I., Mori I., Nishikawa M., Kido M. (2011) Relationship between Lidar-derived Dust Extinction Coefficients and Mass Concentrations in Japan. *SOLA*, 7A, 1-4.
- 3) Bertiger, W., Yoaz Bar-Sever, Angie Dorsey, Bruce Haines, Nate Harvey, Dan Hemberger, Michael Heflin, Wenwen Lu, Mark Miller, Angelyn W. Moore, Dave Murphy, Paul Ries, Larry Romans, Aurore Sibois, Ant Sibthorpe, Bela Szilagy, Michele Vallisneri, Pascal Willis: GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research, *Advances in Space Research*, Volume 66, Issue 3, pp.469-489, 2020.
- 4) Ohta, Y., Iguchi, M., Advective diffusion of volcanic plume captured by dense GNSS network around Sakurajima volcano: a case study of the vulcanian

eruption on July 24, 2012, Journal: Earth, Planets and Space, Volume 67:157, DOI: 10.1186/s40623-015-0324-x, 2015.

5) Thayer, G. D., An improved equation for the radio refractive index of air, Radio Sci., 9(10), 803-807, doi:10.1029/RS009i010p00803, 1974.

6) Bilich, A., Mader, G. L., National Geodetic Survey, GNSS absolute antenna calibration at the National Geodetic Survey, 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Portland, OR, September 21-24, 2010.

7) 真木雅之・鈴木郁子・井口正人・Shakti P.C.: 気象レーダによる降灰量推定—2013年8月18日桜島噴火のZ-RA関係式—、火山、64, 219-241、2019.

8) Maki, M., R. Takaoka, M. Iguchi 2021: Characteristics of particle size distributions of falling volcanic ash measured by optical disdrometers at the Sakurajima volcano, Japan. Atmosphere 2021, 12(5), 601; <https://doi.org/10.3390/atmos12050601>.

9) 真木雅之・小堀壮彦・西 隆昭・藤吉康志・徳島秀彦・佐藤英一・井口正人・爲栗健: 船舶レーダによる桜島火山の噴煙柱モニタリング、—2018年の観測結果—、京都大学防災研究所年報、63B、136-148、2020.

10) Iguchi, M.: Method for real-time evaluation of discharge rate of volcanic ash - case study on intermittent eruptions at the Sakurajima volcano, Japan -, Jour. Disast. Res., Vol. 11, pp.4-14, 2016.

11) 井口正人: 桜島火山の噴火活動—2012年7月~2013年6月—, 桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究, 平成24年度分報告書, pp.1-8, 2013.

12) Chouet, B., Dawson, P. and Arciniega-Ceballos, A., Source mechanisms of Vulcanian degassing at Popocatepetl Volcano, Mexico, determined from waveform inversions of very long period signals, J. Geophys. Res., 110, B07301, doi:10.1029/2004JB003524, 2005.

13) Tanaka, H.L. and M. Iguchi: Numerical simulations of volcanic ash plume dispersal for Sakura-jima using real-time emission rate estimation, Journal of Disaster Research, Volume 14, No.1, pp. 160-172, 2019.

14) Tanaka, H.L., Nakamichi, H., and Iguchi, M.: 2020: PUFF model prediction of volcanic ash plume dispersal for Sakurajima using MP radar observation, Atmosphere, Volume 11, No. 11, 1240, 2020.

15) Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Power, J. G., Duda, M. G., Barker, D. M., Huang, X. Y., A model description of the advanced research WRF model version 4 (No. 980 NCAR/TN-556+STR). Technical Report. National Center for Atmospheric Research. Boulder, 2019. doi:10.5065/1dfh-6p97.

- 16) Folch, A., Costa, A., Macedonio, G., Fall3d: A computational model for transport and deposition of volcanic ash. *Comput. Geosci.*, Volume 35, pp.1334-1342. doi:10.1016/j.cageo.2008.08.008, 2009.
- 17) Poulidis, A. P., Takemi, T., Iguchi, M., Renfrew, I. A., Orographic effects on the transport and deposition of volcanic ash: A case study of Mt. Sakurajima, Japan, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Volume 122, pp.9332-9350, 2017.
- 18) Maki, M., Iguchi, M., Maesaka, T., Miwa, T., Tanada, T., Kozono, T., Momotani, T., Yamaji, A., Kakimoto, I., Preliminary results of weather radar observations of Sakurajima volcanic smoke, *Jour. Disast. Res*, Volume 11, pp.15-30, 2016.
- 19) Takishita, K., Poulidis, A-P., Iguchi, M., In-situ measurement of tephra deposit load based on a disdrometer network at Sakurajima volcano, Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107442, 2021.
- 20) Tanaka, H.L., Development of a prediction scheme for volcanic ash fall from Redoubt Volcano, Alaska. *Proc. First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety*, U.S. Geological Survey, Bulletin 2047, pp.283-291, 1994.
- 21) Folch, A., Mingari, L., Gutierrez, N., Hanzich, M., Macedonio, G., Costa, A., FALL3D-8.0: a computational model for atmospheric transport and deposition of particles, aerosols and radionuclides - Part 1: Model physics and numerics, *Geosci. Model Dev.*, Volume 13, pp.1431-1458, 2020.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等
別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(2) 令和4年度の業務計画案

令和4年度は、令和2年度から4年度までの第2期の最終年度に当たる。令和4年度は火山灰が連続的に放出される状況に対応するために、火山灰拡散予測を連続稼働させるための業務を実施する。また、プロジェクト研究の将来的な社会実装を目指した自治体の防災担当者向けのセミナーを実施するなど、成果の普及に努力する。

(a) 業務計画、実施方法

業務は、以下の6項目について実施する。噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発は令和5年度から実施する予定であったが、1年前倒しして遂行する。

1) プロジェクトの総合推進

当該プロジェクトと関連する「課題C サブテーマ3」および「課題D サブテーマ3」と連携を図りつつ、研究集会を開催する。

2) リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発

霧島、桜島、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島においてレーダー観測を継続し、必要なメンテナンス作業も併せて行う。これまでに桜島を取り巻くように設置したディストロメータによる降灰観測を継続することにより、降灰量の時間変化を把握する。また、噴火頻発期や規模の大きい噴火が発生したときには火山灰採取のキャンペーン観測も実施する。その上で、XバンドMPレーダーにより観測される噴煙の反射強度と地上降灰量、また、ディストロメータの出力値と地上降灰量の関係について、さらに多くの噴火事例を得ることにより、その経験式の精度を上げる。また、複数台の船舶レーダーによる噴煙柱の観測を実施し、既設レーダーの観測データと比較することにより、噴火ソースパラメータの推定を試みる。降灰量-反射強度関係式を適用して、噴火毎の降灰分布と総降灰量を求める。レーダーデータ解析プログラムを改良する。

これまでに設置したGNSSによる噴煙観測を継続する。解析によって得られるLC搬送波位相残差及びSN比の低下について、噴火様式や噴煙に含まれる水蒸気量と関連付けて検討する。

桜島島内に設置した2台のライダーによる火山灰観測を継続する。ライダーで観測可能な火山灰消散係数の上限を決定した上で火山灰消散係数について気候学的解析を行い、大気環境常時監視局データとの照合を行う。火山灰の輸送拡散数値モデルを検証するためのデータセットを引き続き作成するとともに、消散係数と火山灰噴出量の関係を検討する。

なお、研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合において、火山機動観測実証研究事業により緊急観測が実施される際は、前記の技術開発の一環として、その計画の一部もしくはその全てに代えて、緊急観測を実施することあるいは緊急観測に協力することを可能とする。

3) 火山灰拡散予測の高速化技術開発

桜島北部にある北岳の既設観測井に設置されている地震計について、本研究への活用のために引き上げ及び改修作業を行うとともに、北東の高免から南西の柴立に地震計・傾斜計を移設する。これにより、桜島北部および南西方面の火山性微動振幅も考慮することにより、噴出率推定式を高精度化する。また、諏訪之瀬島やインドネシアのシナブン火山について、火山灰噴出率推定式を桜島以外の火山に拡張するための検討を継続する。

課題C3と連携し、噴煙柱形成・火山灰拡散を同時に再現する高精度シミュレーションを実行する。これにより、ブルカノ式噴火の噴火強度に対する噴煙高度と火山灰堆積分布の応答に関するデータベースを充実させる。

4) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

桜島を対象にドローンを用いて上空の風速ベクトルおよび火山灰・火山ガスの計測調査を年間2回程度実施する。主にドローンによる上空の乱流計測の可能性調査および桜島上空の火山灰・火山ガス濃度分布の実測データの蓄積に取り組む。

気象モデルや流体計算モデルを利用し、高分解能での火山灰の拡散シミュレーションを進める。現地の実測データを取り込むことにより、火山灰拡散や降灰のシミュレーションの予測精度の向上を図る。

火山周囲の気流や形状の影響を受けて変化する火山レキの空力特性を取り込んだレキの飛散モデルを、令和3年度に開発した火山周辺の気流予測の計算手法に組み込む。また、住宅の代表的な外装材に対してレキの衝撃試験を行い、建物に衝突した際の破壊性状を明らかにする。これにより、噴石の落下・衝突による被害リスクを評価する。

ディストロメータは火山灰粒子の落下速度も計測できるので、観測された落下速度から見かけの粒子比重を求めることにより、火山灰粒子の凝集の程度をさらに多くのデータを用いて評価する。

5) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発

オンラインで取り込んだ観測データを入力条件とする火山灰拡散予測シミュレータの連続化のためのシステムをワークステーションに構築する。FALL3D8.0をシミュレーションエンジンとして連続化のための改良を行う。時々刻々変化する気象場については、WRFにより高精細化した気象場のうちから現況の気象モデルの予測値に最も適合するものを抽出する。小型XバンドMPレーダー観測による噴煙高度やディストロメータにより得られた降灰量とシミュレーション結果を照合する。

6) 噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発

桜島における過去の地盤変動データを整理し、火山噴火に前駆する地盤変動継続時間および圧力源の前駆体積変化量と噴火に伴う体積変化量の関係をデータベース化する。このデータベースをもとに、噴火の発生時刻と規模を確率的に予測する手法を開発する。

自発的な研究活動等

自発的な研究活動等に関する実施方針に基づき、所属機関が認めた範囲で自発的な研究活動等を推進する。

(b) 目標とする成果

地震・地盤変動の観測データから得られる火山灰噴出率と高解像度風速場データを参照することにより、火山灰拡散予測シミュレータを連続稼働させ、常時、火山灰予測ができる体制を構築する。また、レーダーデータとディストロメータデータを取り込み、照合できるようにする。